

ANNÉE

# DE L'INSTITUT TECHNIQUE DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS

28, boulevard Raspail, Paris-VII<sup>e</sup>

## SOMMAIRE

	SERVICE
26. JOISEL, <b>Concassage et fragmentation des roches</b> (Matériel de Chantier, n° 1). . . . .	A B
27. CAMBON, <b>Caisson mobile autoflotteur</b> (Travaux Publics, n° 1). . . .	A B
28. HÉRODY, <b>Bistre, suie, calcin</b> (Équipement Technique, n° 1) . . . . .	A
29. H. LAFUMA, <b>Le Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie des liants hydrauliques</b> (Liants Hydrauliques, n° 2) . . . . .	A B
30. LAURU, <b>Les Chantiers en face de la préparation du travail</b> (Questions Générales, n° 4). . . . .	A B
31. A. MARINI, <b>Le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment</b> (Questions Générales, n° 5). . . . .	A B

CENTRE D'ÉTUDES SUPÉRIEURE  
ET DE DOCUMENTATION TECHNIQUE  
28, BOULEVARD RASPAIL, PARIS (VII<sup>e</sup>)

LABORATOIRES DU BATIMENT  
ET DES TRAVAUX PUBLICS  
12, RUE BRANCION, PARIS (XV<sup>e</sup>)

BUREAU SECURITAS  
9, AVENUE VICTORIA, PARIS (IV<sup>e</sup>)

CENTRE D'INFORMATION ET DE  
DOCUMENTATION DU BATIMENT  
100, RUE DU CHERCHE-MIDI, PARIS (VI<sup>e</sup>)

## SERVICES DES ANNALES

---

Le service des Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics est réservé à ses adhérents (conditions d'adhésion et liste des conférences de la Session sur demande).

**Le Service complet A** comprend tous les fascicules qui paraîtront en 1948 dans toutes les séries.

**Le Service réduit B** comprend les fascicules ayant trait aux questions de résistance des matériaux théorique et

expérimentale, de construction métallique, de travaux publics et d'ouvrages d'art, de liants hydrauliques, de béton, de béton armé, de béton précontraint, de matériel de chantier, et les fascicules où paraissent les différents chapitres du Manuel du Béton armé, du Manuel de la Charpente en bois et du Manuel de la Construction métallique.

**Le Service réduit C** comprend les fascicules ayant trait aux questions d'architecture, de matériaux, d'équipement

technique (électricité, chauffage et ventilation, froid, acoustique, plomberie), et d'aménagement intérieur.

Les services réduits B et C comprennent tous les deux les fascicules ayant trait aux questions de géologie, de sol et fondations, de maçonnerie, de charpente en bois, de couverture et étanchéité, de documentation technique, d'hygiène et sécurité, aux questions économiques et aux questions générales.

## RÉPARTITION DES MATIÈRES DANS LES DIFFÉRENTES SÉRIES

---

### ARCHITECTURE ET URBANISME

Étude des besoins à satisfaire, le programme. La composition - L'esthétique - L'archéologie - Ouvrages liés directement à la vie de l'homme (Habitations, autres ouvrages).

### TECHNIQUE GÉNÉRALE DE LA CONSTRUCTION

Procédés de construction - Préfabrication - Protection contre les phénomènes naturels, corrosion.

### THÉORIES ET MÉTHODES DE CALCUL

Résistance des matériaux - Mécanique des fluides - Stabilité et Sécurité des constructions.

### ESSAIS ET MESURES

Essais des matériaux ou des structures en général en Laboratoires ou sur chantier - Machines d'essais.

### MATÉRIAUX (sauf agrégats et liants hydrauliques)

Métalliques - Naturels - Artificiels (sauf liants hydrauliques) - Organiques.

### LIANTS HYDRAULIQUES

Plâtres. Chaux. Liants à maçonner. Ciments.

### SOLS ET FONDATIONS

Minéralogie - Carrières - Géologie - Géotechnique (circulation des eaux, drainage, tenue des sols) - Infrastructure (stabilisation des sols, soutènement, fondations, etc.).

### GROS-ŒUVRE

Maçonnerie - Couverture - Étanchéité - Charpente en bois.

### BÉTON. BÉTON ARMÉ

Agrégats - Mortiers - Béton ordinaire - Bétons spéciaux (hydrocarbures, à entraînement d'air) - Béton armé.

### BÉTON PRÉCONTRAINTE

### CONSTRUCTION MÉTALLIQUE

Mise en œuvre, soudure, rivure et autres assemblages - Charpente métallique.

### TRAVAUX PUBLICS

Voies de communication et travaux à la mer - Voies terrestres - Navigations fluviale et maritime - Voies aériennes - Travaux hydrauliques - Captages - Terrassements - Travaux souterrains - Travaux sous l'eau - Alimentation en eau.

### ÉQUIPEMENT TECHNIQUE

Plomberie sanitaire - Eaux usées - Climatatisation - Chauffage, combustibles -

Conditionnement de l'air - Ventilation - Froid - Éclairage, installations électriques - Acoustique, insonorisation - Incendie - Danger aérien - Installations mécaniques (ascenseurs, éleveurs, escaliers mécaniques, tapis roulants).

### AMÉNAGEMENTS INTÉRIEURS

Peinture, vitrerie (travaux et produits de peinture) - Menuiserie, quincaillerie - Marbrerie - Revêtement staff - Panneaux en produits divers - Décoration - Enseignes et stands.

### MATÉRIEL DE CHANTIER

### DOCUMENTATION

Études générales - Documentation technique.

### QUESTIONS GÉNÉRALES

Questions juridiques - Questions économiques - Questions contractuelles - Questions diverses - Hygiène et sécurité des chantiers - Questions générales d'organisation (planning et coordination) - Industrialisation - Facteur humain - Normalisation - Contrôle.

### MANUEL DU BÉTON ARMÉ

### MANUEL DE LA CHARPENTE EN BOIS

### MANUEL DE LA CONSTRUCTION MÉTALLIQUE

# ANNALES DE L'INSTITUT TECHNIQUE DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS

28, BOULEVARD RASPAIL, PARIS-VII<sup>e</sup>

Juin 1948

N° 26

Nouvelle série.

## MATÉRIEL DE CHANTIER, N° 1

# LE CONCASSAGE ET

# LA FRAGMENTATION DES ROCHES

Par **M. Albert JOISEL**, Ancien élève de l'École Polytechnique,  
Chef de la Section du Matériel de chantier aux Laboratoires du Bâtiment et des Travaux Publics.

### SOMMAIRE

	Pages.		Pages.
AVANT-PROPOS .....	2	III. — Appareils giratoires .....	34
CHAPITRE I. — Mesure des fragments .....	3	IV. — Appareils à cylindres .....	38
I. — Dimensions et forme des fragments .....	3	V. — Appareils à boulets. ....	39
II. — Mesure des dimensions .....	4	VI. — Appareils à percussion .....	49
III. — Mesure de la surface des fragments .....	10	VII. — Appareils à meules .....	50
IV. — Représentations graphiques. ....	15	VIII. — Appareils à pilons .....	50
CHAPITRE II. — Caractéristiques des roches .....	17	IX. — Appareils combinés .....	51
I. — Caractéristiques minéralogiques et chimiques. ....	17	CHAPITRE IV. — Lois de la fragmentation .....	52
II. — Caractéristiques physiques .....	18	I. — Travail et rendement de la fragmentation ..	52
III. — Caractéristiques mécaniques .....	19	II. — Processus de la fragmentation .....	60
IV. — Relations entre les différentes caractéristiques. ....	24	III. — Granulométrie des matériaux fragmentés ..	61
CHAPITRE III. — Appareils de fragmentation .....	25	IV. — Formes des fragments .....	65
I. — Généralités .....	25	V. — Installations de concassage .....	66
II. — Appareils à mâchoires .....	26	CONCLUSION .....	68
		BIBLIOGRAPHIE .....	68

*Reproduction interdite.*

LABORATOIRES DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS

## AVANT-PROPOS

*Le problème de la fragmentation est l'un des chapitres les moins connus de la mécanique physique des solides. La technique du concassage qui en dépend fait appel, plus à des procédés empiriques et à des habitudes acquises qu'à une doctrine bien précise. C'est pour tenter de combler cette lacune que nous avons décidé d'entreprendre, au Laboratoire, des travaux sur ce sujet. La première partie de ces travaux comprend une mise à jour des notions acquises. C'est « l'Instruction du Problème » et la recherche des idées générales qui doivent précéder l'étude expérimentale qui est donnée dans ce cahier. Elle a été traitée avec beaucoup d'intelligence par M. JOISEL. Il est arrivé à faire de ce mémoire préliminaire un véritable précis de la théorie du concassage dans son état actuel. Il a émis quelques idées nouvelles qui valent d'être examinées avec attention et que les essais qu'il vient d'entreprendre permettront de développer.*

R. L'HERMITE,

Directeur des Laboratoires du Bâtiment et des Travaux Publics.

## INTRODUCTION

La fragmentation intéresse de nombreux domaines : toutes les activités économiques essentielles en dépendent plus ou moins, puisqu'elles emploient toutes des métaux qui proviennent de minerais broyés. Le ciment des bâtiments que nous habitons, les peintures qui les ornent et les protègent, le charbon qui nous chauffe ont été broyés. Les barrages qui nous fournissent l'électricité, les routes, les voies ferrées contiennent des pierres cassées. Le pain lui-même ne peut être fait sans moulin. Au total, près d'un milliard de tonnes de matériaux passent chaque année dans les concasseurs et les broyeurs du monde entier.

L'étude qui va suivre a pour but de faire le point du problème général de la fragmentation des roches : le *chapitre premier* groupe tout ce qui concerne la définition du problème, c'est-à-dire la mesure des dimensions des fragments et de leur surface; le *chapitre II* est consacré à l'étude des matériaux; le *chapitre III* à celle des appareils, enfin le *chapitre IV* concerne l'étude de la fragmentation.

Bien que le sujet soit vaste, nous nous sommes efforcé d'en faire un exposé à la fois court et complet.

## CHAPITRE PREMIER

### MESURE DES FRAGMENTS

Les méthodes utilisées pour mesurer les dimensions et la surface des fragments et pour apprécier leur forme sont très variées. Nous ne développerons que celles qui sont essentielles pour la théorie de la fragmentation des roches, et en particulier pour l'étude des lois de la fragmentation (qui sera faite au chapitre IV).

#### I. — DIMENSIONS ET FORME DES FRAGMENTS

##### A. — DIMENSIONS

###### 1° APPELLATIONS DIVERSES

1. — La longueur  $l$ , la largeur  $d$ , et l'épaisseur  $e$ , d'un fragment sont celles du parallélépipède rectangle de volume minimum qui lui est circonscrit.

Quand nous parlerons de la dimension d'un fragment, sans autre précision, il s'agira de la dimension mesurée. Par exemple, la dimension d'un fragment passant juste à travers une passoire est le diamètre des trous de cette passoire; la dimension d'un fragment tombant en chute libre dans un fluide est le diamètre du fragment sphérique de même densité qui tomberait à la même vitesse, ou diamètre équivalent.

Le diamètre moyen d'un fragment est le diamètre de la sphère de même volume.

En général, la « dimension » d'un fragment est voisine de sa largeur.

###### 2° DÉFINITION DES FRAGMENTS D'APRÈS LEUR DIMENSION

###### a) Norme P. 18 304.

2. — On dit qu'un agrégat est du type  $d/D$  :

s'il reste moins de 10 % de refus sur la passoire d'ouverture  $D$ ;

s'il passe moins de 10 % à travers la passoire d'ouverture  $d$ ;

et s'il passe moins de 3 % à travers la passoire dont le module

est inférieur de 3 à celui de la passoire  $d$ , si celui-ci est  $\leq 38$ ,

ou inférieur de 4 à celui de la passoire  $d$ , si celui-ci est  $> 38$ .

APPELLATION	DIAMÈTRE DES TROUS des passoires (mm)
Farine .....	$< 0,1$
Sable { fin..... moyen..... gros.....	0,1/0,4 0,4/1,6 1,6/6,3
Gravillon { petit..... moyen..... gros.....	6,3/10 10/16 16/25
Pierres cassées et cailloux { petits..... moyens..... gros.....	25/40 40/63 63/100
Moellons et galets.....	$> 100$

REMARQUE : Les farines ont des dimensions très variables de 0,1 mm à 0,000 001 mm (1  $\mu\mu$ ) environ.

###### b) Matériaux d'empierrement.

Macadam : 25 à 63 mm environ,  
Ballast : 63 à 100 mm environ.

##### B. — FORME

3. — Pour chiffrer la forme d'un fragment, on exprime généralement une relation entre ses trois dimensions et son volume  $v$ .

1° COEFFICIENT VOLUMÉTRIQUE (selon l'AFNOR)  $\frac{v}{\pi L^3}$   
6

( $L$  est la plus grande dimension, et non la longueur.)

La mesure se fait sur 250 g de fragments supérieurs à 6,3 mm.

#### EXEMPLES

Sphère : 1	Cailloux roulés : 0,34 environ
Cube : $\frac{2}{\pi\sqrt{3}} = 0,37$	Cailloux anguleux : 0,22 environ
Tétraèdre régulier : $\frac{1}{\pi\sqrt{2}} = 0,22$	« Plaquettes » : 0,07 environ
	« Aiguilles » : 0,01 environ

#### 2° MODULE D'ALLONGEMENT : $\frac{l}{d}$

[Pour les ballasts et gravillons routiers, les normes américaines imposent que ce module ne dépasse pas 5 (voir n° 134).]

#### 3° MODULE D'APLATISSEMENT : $\frac{d}{e}$

On dit qu'un fragment est ramassé (ou cubique, ou régulier) si ses deux modules d'allongement et d'aplatissement sont voisins de 1.

#### 4° REPRÉSENTATION GRAPHIQUE DE LA FORME

##### a) Carré des formes de M. Pavillon (fig. 1).

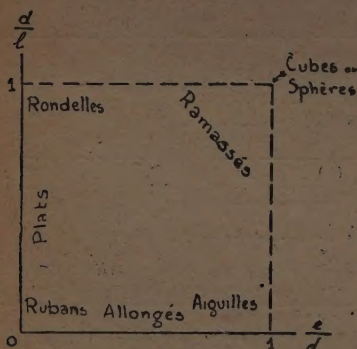


FIG. 1.

##### b) Représentation de Walz (fig. 2).

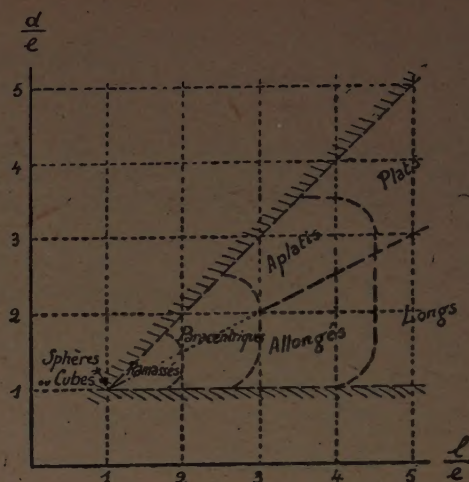


FIG. 2.

Chaque fragment a une forme particulière. Aucune méthode ne peut exprimer cette forme avec précision. Par exemple, dans les deux représentations que nous venons d'exposer, les sphères et les cubes correspondent au même point.

#### 5° RELATION ENTRE LES DIMENSIONS ET LE VOLUME

Pour des gravillons de porphyre, M. PAVILLON a trouvé que l'expression  $\sqrt[3]{\frac{v}{lde}}$  a pour valeur moyenne 0,718 avec un écart probable voisin de 0,016.

## II. — MESURE DES DIMENSIONS

### A. — MESURE DIRECTE

(C'est la seule méthode qui permette de mesurer la longueur avec précision.)

#### 4. — 1° Pied à coulisse (pour les gros fragments).

#### 2° Anneau.

On dit qu'un fragment passe à l'anneau  $a$  quand il peut passer dans cet anneau quelle que soit son orientation. L'opération ne peut se faire qu'à la main.

#### 3° Microscope.

Les dimensions maxima et minima d'un fragment vu au microscope correspondent à peu près à sa longueur et à sa largeur, car son épaisseur s'oriente sensiblement dans la direction de l'axe optique.

On peut se donner une direction  $\Delta$  et mesurer le diamètre statistique moyen  $D$  d'un ensemble de  $n$  fragments : moyenne des diamètres  $AB, A'B', \dots$  obtenus en maintenant le micromètre parallèle à  $\Delta$  et en faisant passer successivement à peu près au milieu de chaque fragment (fig. 3).

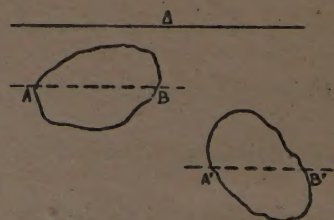


FIG. 3.

L'aire projetée par l'ensemble est :

$$A = n \frac{\pi D^2}{4}$$

Le rapport poids de l'ensemble  $A$

donne une idée de la forme moyenne des grains.

# MATÉRIEL DE CHANTIER

L'opération peut se faire sur une photographie agrandie.

Le microscope ne peut plus être utilisé au-dessous de 0,005 mm.

(Il permet encore de voir des particules jusqu'à 0,0002 mm. Les particules plus petites (colloïdales) sont visibles à l'ultra-microscope jusqu'à 1  $\mu$ , mais on ne peut guère en apprécier le nombre et la dimension.)

## B. — TAMISAGE

### 1° PASSOIRES ET TAMIS DE CONTRÔLE NORMAUX

(Norme X. 11501.)

#### a) Ouverture.

5. — C'est le diamètre de la perforation (passoires) ou le côté du vide de la maille (tamis).

La série principale des nombres normaux (0,040 — R 10 — 5,00) comprend les nombres en progression géométrique de raison  $\sqrt[10]{10} = 1,259$  de 0,040 à 5,00.

OUVERTURE DU TAMIS	MODULE	OUVERTURE DE LA PASSOIRE correspondante
mm		mm
0,04 (limite pratique)	17	(0,05)
0,05	18	(0,063)
0,063	19	(0,08)
0,08	20	(0,1)
0,01	21	(0,125)
0,125	22	(0,16)
0,16	23	(0,2)
0,2	24	(0,25)
0,25	25	(0,315)
0,315	26	(0,4)
0,4	27	0,5
0,5	28	0,63
0,63	29	0,8
0,8	30	1
1	31	1,25
1,25	32	1,6
1,6	33	2
2	34	2,5
2,5	35	3,15
3,15	36	4
4	37	5
5	38	6,3
	39	8
	40	10
	41	12,5
	"	"
	"	"
	"	"
	"	"
	50	100

(n'existent pas)

Le module (arrondi à l'unité) = 10 fois le logarithme décimal de l'ouverture en microns, pour les passoires. (On voit que pour les tamis on ajoute 1 au module algébrique arrondi.)

La série secondaire a pour raison  $\sqrt[10]{10}$ .

La série tertiaire a pour raison  $\sqrt[10]{10}$ .

#### b) Prise d'échantillon.

Le poids P de l'échantillon en kilogrammes doit être au moins égal à deux fois la dimension des plus gros fragments en millimètres.

#### c) Charge limite des tamis.

Pour les ouvertures < 0,4 mm, la charge à ne pas dépasser est 50 g.

Pour les ouvertures < 1,6 mm, la charge à ne pas dépasser est 100 g.

Pour les ouvertures  $\leq$  5 mm, la charge à ne pas dépasser est 200 g.

#### d) Mode opératoire.

On tient l'appareil d'une main et on le frappe sur l'autre main à 125 coups/mn.

On le tourne de 90° tous les 25 coups.

On arrête l'opération quand une série de 25 coups fait passer moins de 1/200 du refus.

#### e) Exécution du tamisage.

On sèche l'échantillon et on le sépare approximativement avec les passoires de 25 mm, 5 mm et 0,5 mm. On trouve ainsi quatre sous-échantillons :

$$P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = P$$

On mélange chacun des quatre sous-échantillons pour les rendre homogènes et on en conserve respectivement :

$$\begin{aligned} P_1 &= 20 \text{ kg} \\ P_2 &= 5 \text{ kg} \\ P_3 &= 500 \text{ g si la majorité est } > 1 \text{ mm} \\ &250 \text{ g } < 1 \text{ mm} \\ P_4 &= 200 \text{ g } > 0,25 \text{ mm} \\ &100 \text{ g } < 0,25 \text{ mm} \end{aligned}$$

On tamise successivement  $p_1 p_2 p_3$  en commençant pour chacun par les passoires les plus larges, puis  $p_4$  avec les tamis.

#### f) Expression des résultats.

Si  $a_k$  est la fraction de  $p_k$  passant à travers une passoire (tamis) donnée, la fraction de l'échantillon P passant à travers la même passoire est :

$$A = \sum \left[ a_k \times \frac{P_k}{P} \right]_{k=1, 2, 3, 4.}$$

On ramène tout aux passoirs et on exprime les résultats en pourcentages avec une décimale.

On indique la forme et l'état de surface des différentes catégories.

REMARQUE : Les anciens tamis français étaient généralement désignés par le nombre de mailles par pouce linéaire (27,8 mm), ou par le nombre de mailles par centimètre carré.

Les tamis anglo-saxons sont désignés par le nombre de meshes par pouce anglais (25,4 mm).

## 6. — 2<sup>o</sup> CRIBLAGE INDUSTRIEL

### a) Tamis.

1<sup>o</sup> Tamis fixes : pente 40°.

2<sup>o</sup> Tamis à secousses : pente 0 à 22°.

3<sup>o</sup> Tamis vibrants : pente 0 à 22°. Ils sont actionnés par des moteurs électriques à balourd.

Vitesse : 1 000 à 3 000 tours/minute

Course : 2 à 4 mm.

### b) Trommels.

Diamètre : au moins 10 fois la dimension des fragments.

Longueur : 6 à 8 diamètres.

Vitesse de rotation : 10 à 15 tours/minute.

### c) Rendement du criblage.

C'est le rapport

$$\frac{\text{tamisat pratique (ce qui a réellement passé)}}{\text{tamisat théorique (ce qui aurait dû passer)}}$$

Il est voisin de 85 % en général.

(Nous désignons par « tamisat » le poids de matière passant à travers le tamis.)

## 3<sup>o</sup> CRIBLES PARTICULIERS

7. — Les cribles à trous ronds ou carrés classent les fragments sensiblement selon leur largeur. Les fragments classés ainsi entre deux cribles voisins peuvent cependant avoir des volumes très différents : par exemple des gravillons de porphyre retenus sur le tamis de module 34 et passant au tamis de module 35 pèsent de 1 à 16 g inclusivement.

Aucun crible ne peut classer les fragments selon leur longueur; mais les cribles à trous oblongs les classent sensiblement selon leur épaisseur.

### a) Passoirs à trous elliptiques ou rectangulaires.

Pour la classe  $a/2a$  les trous ont pour longueur au moins  $2a$  et pour largeur  $\frac{a}{2}$ . On obtient ainsi une valeur approchée du module d'aplatissement par le rapport

$$\frac{\text{diamètre des trous circulaires}}{\text{petit axe des trous elliptiques}}$$

de deux passoirs laissant passer chacune juste la moitié du poids de l'échantillon (R. FÉRET).

### b) Trommel pour gravillon routier.

Les fragments allongés roulent en tournant leur plus grande dimension perpendiculairement à la direction de leur mouvement. C'est donc dans ce sens que doivent être orientés les trous oblongs (fig. 4).

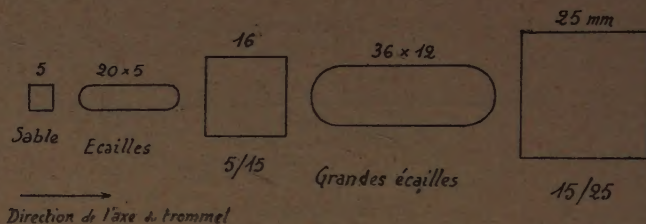


FIG. 4.

## 4<sup>o</sup> FILTRATION

### 8. — C'est un tamisage par voie humide.

Le papier filtre permet de séparer des particules de l'ordre de 1  $\mu$ .

La membrane colloïdale de nitrocellulose (ultra-filtre) permet de séparer des particules de l'ordre de 1  $\mu$ . Une pression de 40 atmosphères est alors nécessaire.

## C. — APPRÉCIATION DE LA FORME PAR TASSEMENT

9. — Le nombre de fragments, tamisés entre deux passoirs voisins, qu'on peut faire tenir dans une capacité donnée est d'autant plus faible qu'ils sont plus « ramassés ». On en a déduit des méthodes statistiques variées pour exprimer un coefficient de forme d'un ensemble.

## D. — LÉVIGATION

### 1<sup>o</sup> PRINCIPE

10. — Les fragments inférieurs à 0,04 mm ne peuvent pas être séparés par tamisage. Cependant nous verrons qu'ils ont une grande influence sur le travail de fragmentation car leur surface spécifique (surface par unité de poids) est très grande (n<sup>o</sup> 99).

Les principales méthodes d'investigation de cette granulométrie sont basées sur la loi de Stokes :

La vitesse de fines particules sphériques tombant en chute libre dans un fluide est donnée par la formule :

$$v \text{ (cm/s)} = \frac{g\delta d^2}{18u}$$

$\delta$  = différence des poids spécifiques de la particule et du fluide;  
 $g = 981 \text{ cm/s}^2$  (aux États-Unis  $g = 980 \text{ cm/s}^2$ );  
 $d$  = diamètre de la particule en centimètres;  
 $u$  = viscosité du fluide en poises.

Exemple : Quartz dans l'eau à 20°.

$$\begin{aligned} \delta &= 2,65 - 1 = 1,65 \\ u &= 1\,003 \times 10^{-5} \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \text{on trouve} \\ v = 8\,950 \, d^2 \text{ (fig. 5)} \end{array} \right\}$$

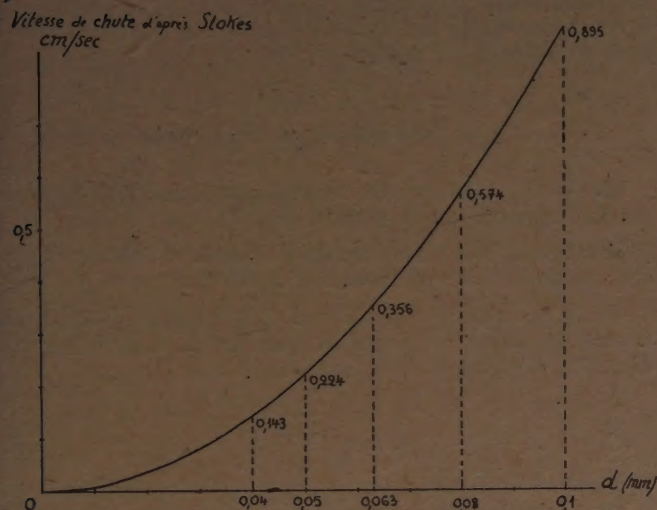


FIG. 5.

(une variation de température de  $\pm 1^\circ$  donne une variation de viscosité de l'eau voisine de  $\pm 2\%$ ).

### Critique de la loi de Stokes.

a) Cette loi n'est exacte que pour des particules *infinitement petites*, pour lesquelles le fluide reste immobile. Pour l'établir, on égale la force de pesanteur  $\frac{\pi \delta d^3}{6}$  et la résistance du fluide au mouvement de la particule :

$$R = 3\pi u d v$$

Mais, en réalité, cette formule n'est que le premier terme d'un développement en série.

b) La viscosité croît avec le nombre des particules en suspension. EINSTEIN a donné la formule

$$u = u_0 (1 + 2,5\varphi)$$

où :

$u_0$  = viscosité quand il n'y a pas de particule;  
 $\varphi$  = volume des particules en suspension par unité de volume de fluide.

c) La loi de STOKES n'est valable que pour une *particule isolée*. On a remarqué que deux sphères égales placées initialement l'une à côté de l'autre dans un fluide descendent moins vite qu'une seule. Au contraire, deux sphères décalées descendent plus vite qu'une seule.

d) Les grosses particules descendent plus vite que les petites. Elles peuvent donc en entraîner dans leur chute. A cet égard, la méthode sera donc d'autant plus précise que la *concentration* sera plus faible.

Au total, la vitesse  $v$  donnée par la loi de STOKES pour les particules est trop faible. A la suite de nombreuses expériences, le Bureau des Mines des États-Unis a adopté pour le quartz dans l'éluviateur que nous verrons plus loin (n° 13), le facteur correctif  $f = 1,7$ .

D'où :

$$d = \sqrt{\frac{18uv}{1,7g\delta}} = \sqrt{\frac{10,6uv}{g\delta}}$$

En appliquant la loi de STOKES, on ferait donc une erreur d'environ  $1 - \sqrt{\frac{1}{1,7}} = 23\%$  sur  $d$ . (En réalité, ce facteur  $f$  doit dépendre de  $d$  et varie probablement dans le même sens.)

On utilise un fluide non réactif. Pour remédier à la *floculation* des particules (due à la présence de charges positives), on ajoute à la suspension une petite quantité de substance augmentant le pH du fluide (pyrophosphate de sodium, par exemple, à raison de 0,005 molécule par litre).

Pour quelques substances particulièrement alcalines, on ne peut pas éviter la floculation. Dans ce cas, la méthode n'est pas applicable.

Dans tous les cas, la suspension doit être agitée vigoureusement avant la lévigation.

Si le fluide est un gaz, la méthode prend le nom de *flourométrie*.

Exemple : Ciment dans l'air à 20°.

$$\begin{aligned} \delta &= 3,1 \\ u &= 0,000183 \end{aligned}$$

$d(\mu)$	5	10	20	40	60
$v(\text{cm/s})$	0,23	0,92	3,68	14,7	33,2

La loi de STOKES est valable pratiquement pour des particules dont le *diamètre équivalent* est compris entre 0,005 et 0,1 mm.

Pour les particules colloïdales ( $< 1 \mu$ ) intervient le *mouvement brownien*.

Pour les particules supérieures à 0,1 mm, on a proposé des lois où  $d$  est affecté d'un exposant variant de  $3/2$  à  $1/2$ .

### 2° SÉDIMENTATION

#### a) Pipette d'Andreasen.

11. — On introduit dans un récipient 500  $\text{cm}^3$  d'eau et un poids  $P$  d'échantillon correspondant à environ 1 % en volume. On agite, puis on laisse reposer la suspension. Chaque particule prend alors une vitesse uniforme correspondant à son « diamètre équivalent »  $d$ .

Au bout du temps  $t$ , on fait avec la pipette un prélèvement de  $10 \text{ cm}^3$  au point A (fig. 6). On le dessèche et on pèse le résidu. Soit  $p$  grammes ( $\text{Si } t = 0, p = \frac{P}{50}$ ). L'espace parcouru par une particule de diamètre  $d$  pendant le temps  $t$  est :

$$\frac{g\delta d^2 t}{18u}$$

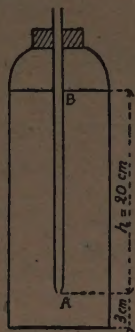


FIG. 6.

Les particules pour lesquelles  $\frac{g\delta d^2 t}{18u} > h$ , c'est-à-dire  $d > \sqrt{\frac{18uh}{g\delta t}}$  sont toutes au-dessous du point A. Elles ne figurent donc pas dans le prélèvement.

Les particules pour lesquelles  $d < \sqrt{\frac{18uh}{g\delta t}}$  ont toutes descendu d'une même hauteur, inférieure à  $h$ . Leur concentration en A est donc la même que la concentration initiale.

Le résidu du prélèvement effectué au temps  $t$  est donc égal au tamisat d'une passoire (fictive) d'ouverture  $d = \sqrt{\frac{18uh}{g\delta t}}$  dans laquelle on aurait tamisé un poids  $P = \frac{P}{50}$

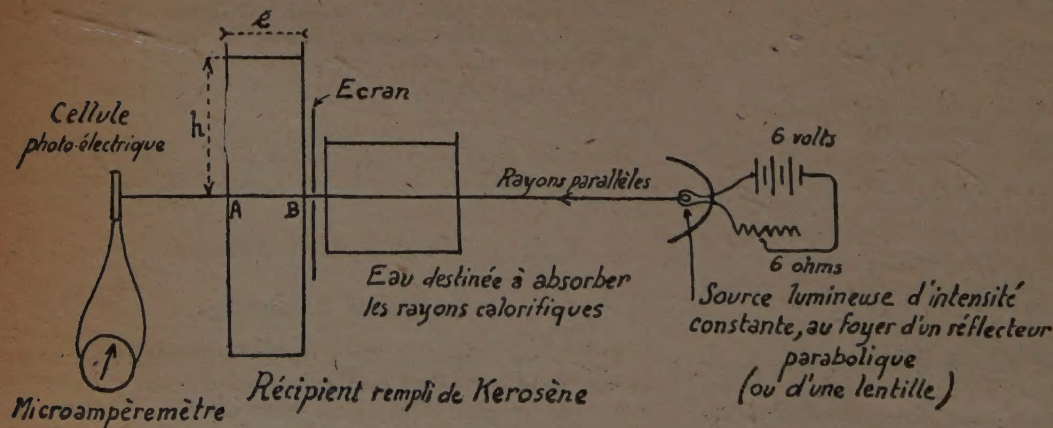


FIG. 7.

**Remarque :** 1. On peut effectuer le prélèvement à une hauteur moindre que 20 cm et hâter ainsi l'opération, car les fines particules descendent très lentement. Par exemple, si

$$\left. \begin{array}{l} u = 0,01 \text{ poise (eau à } 20^\circ) \\ h = 20 \text{ cm} \\ \delta = 1,65 \text{ (quartz)} \\ d = 0,0005 \text{ cm} \end{array} \right\} t = \frac{18uh}{g\delta d^2} = 148 \text{ heures}$$

2. Le prélèvement en A provoque une *turbulence* du fluide. Cet inconvénient est pallié par divers procédés, par exemple en pesant les particules qui se déposent dans un plateau suspendu dans le fluide.

### b) Turbidimètre de Wagner.

12. — Le schéma du turbidimètre employé pour le ciment portland est le suivant (fig. 7).

Le ciment, introduit dans le récipient, trouble le Kérosène, c'est-à-dire qu'il absorbe de la lumière.

Après  $t$  secondes, le niveau AB auquel passent les rayons lumineux ne contient que les particules dont le diamètre équivalent est inférieur à :

$$(1) \quad d = \sqrt{\frac{18uh}{g\delta t}}$$

Tout se passe donc comme si la suspension ne contenait qu'elles.

### DÉFINITION DE LA TURBIDITÉ DE LA SUSPENSION

$$T = \log \frac{I_0}{I} = \log I_0 - \log I$$

$I_0$  = intensité lumineuse parvenant à la cellule photoélectrique quand le Kérosène ne contient aucune particule.

$I$  = intensité lumineuse parvenant à la cellule quand le ciment est en suspension dans le Kérosène.

### RELATION ENTRE LA TURBIDITÉ ET LA SURFACE DES PARTICULES

En faisant varier la concentration du ciment dans une quantité fixe de Kérosène, on fait varier la surface totale des particules qui s'y trouvent (sans qu'il soit nécessaire de connaître la valeur absolue de cette surface). De multiples essais ont permis de vérifier la loi de Beer :

$$\text{Concentration} = \frac{K}{e} (\log I_0 - \log I_d)$$

$I_d$  = intensité lumineuse parvenant à la cellule photo-électrique au temps  $t$  défini par la formule (1);

$K$  = constante;

$e$  = épaisseur de fluide traversée.

On peut donc écrire ;

$$(2) \quad S_d = c(\log I_0 - \log I_d) = cT_d$$

$S_d$  = surface totale de toutes les particules  $< d$ ;

$c$  = Constante de translucidité, supposée indépendante de la dimension des particules.

(En réalité,  $c$  dépend légèrement de la dimension et de la forme des particules.)

### RÉPARTITION GRANULOMÉTRIQUE

En mesurant pour différents temps  $t$  l'intensité lumineuse  $I_d$  et en calculant chaque fois  $d$  par la formule (1), on peut tracer le graphique représentant la variation de  $T_d = \log I_0 - \log I_d$  en fonction de  $d$  (fig. 8).

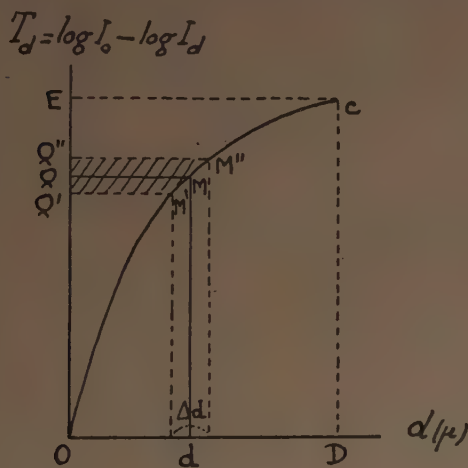


FIG. 8.

La surface totale des particules de la suspension comprises entre :

$$\left[ d - \frac{\Delta d}{2} \right] \quad \text{et} \quad \left[ d + \frac{\Delta d}{2} \right] \quad \text{est :}$$

$$\Delta S = S_{d+\frac{\Delta d}{2}} - S_{d-\frac{\Delta d}{2}} = c \left[ \log I_{d-\frac{\Delta d}{2}} - \log I_{d+\frac{\Delta d}{2}} \right]$$

Pour une particule sphérique de poids  $p$ , de poids spécifique  $S$  et de surface  $s = \pi d^2$ , on a :

$$p = \frac{\pi d^3}{6} S = \frac{s d \delta}{6}$$

L'ensemble des particules comprises entre  $d - \frac{\Delta d}{2}$  et

$d + \frac{\Delta d}{2}$  a donc pour poids :

$$\Delta P = \frac{\Delta S d \delta}{6} = \frac{c \delta}{6} d \times \left( \log I_{d-\frac{\Delta d}{2}} - \log I_{d+\frac{\Delta d}{2}} \right) = \frac{c \delta}{6} (\text{aire } M'M''Q'Q').$$

Et l'ensemble des particules  $< d$  a pour poids :

$$(3) \quad P_d = \frac{c \delta}{6} (\text{aire } OMQ)$$

(C'est l'équivalent du tamisat d'une passoire fictive d'ouverture  $d$ .)

### CALCUL DE LA CONSTANCE DE TRANSLUCIDITÉ

Cette constante se déduit de la relation (3) pour une dimension  $D$  assez grande pour correspondre à un tamis réel. On pèse le tamisat  $P_D$  de ce tamis (pour la même quantité de ciment que celle qui a été introduite dans le récipient rempli de Kérosène). On mesure  $\delta$  et l'on calcule l'aire (OCE).

D'où :

$$(4) \quad c = \frac{6P_D}{\delta (\text{aire } OCE)}$$

**Calcul pratique :** On utilise 0,3 à 0,5 g de ciment (suivant qu'il est plus ou moins fin) et 335 cm<sup>3</sup> de Kérosène, auxquels on ajoute 5 gouttes d'acide oléique (agent défloculateur, qui ne change pas la viscosité).

En prenant  $\delta = 3,15$

$D = 60 \mu$  (voisin du tamis de module 18)

$I_0 = 100$  microampères

et en effectuant les mesures de  $I_d$  correspondant à  $d = 7,5; 10; 15; 20; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 55; 60 \mu$ , on calcule l'aire (OCE) = (ODCE) — (ODC).

On trouve (OCE) =  $5(1,5 + 0,75 \log I_{7,5} + \log I_{10} + \dots + \log I_{50} + \log I_{60} - 11,5 \log I_{60})$ .

On en déduit  $c$  par la formule (4).

La courbe granulométrique s'obtient en appliquant la formule (3).

Le calcul de la surface spécifique se fait grâce à la formule (2).

**Remarque :** Si l'on dispose d'un ciment de référence, de surface spécifique connue  $S$ , on peut obtenir directement la surface spécifique  $S'$  d'un échantillon quelconque.

En effet, si l'on opère dans les mêmes conditions sur le ciment de référence et sur l'échantillon, on a :

$$\frac{S}{S'} = \frac{T}{T'}$$

( $T$  et  $T'$  étant les turbidités respectives des deux ciments).

c) Il existe beaucoup d'autres méthodes de sédimentation que nous n'étudierons pas, en particulier, des méthodes basées sur la variation de la densité de la suspension, et des méthodes basées sur le déplacement du centre de gravité de la suspension (mesuré par oscillation pendulaire).

3<sup>e</sup> DÉCANTATION

13. — Au lieu de laisser descendre les particules en chute libre dans un tube rempli de fluide, on peut faire remonter ce fluide avec un courant de vitesse  $v$ .

Ce courant décante toutes les particules dont la vitesse en chute libre serait inférieure à  $v$ , c'est-à-dire dont le « diamètre équivalent » est inférieur à :

$$d = \sqrt{\frac{18\mu v}{g\delta}}$$

c'est-à-dire les particules correspondant au refus d'une passoire fictive d'ouverture  $d$ .

EXEMPLE : ÉLUTRIATEUR DU BUREAU DES MINES  
DE SALT LAKE CITY

On introduit dans le tube 200 cm<sup>3</sup> de solution de gomme arabique, à 0,1 % et 25 g. d'échantillon (la gomme arabique disperse les particules) (fig. 9).

L'eau du réservoir à niveau constant contient 0,05 % de gomme arabique au début; ensuite on l'alimente avec de l'eau pure.

On laisse la dispersion s'effectuer pendant 24 h. La température initiale est 21° (pour tenir compte de la présence de la gomme); ensuite elle est progressivement ramenée à 20°; ainsi la viscosité est maintenue constante.

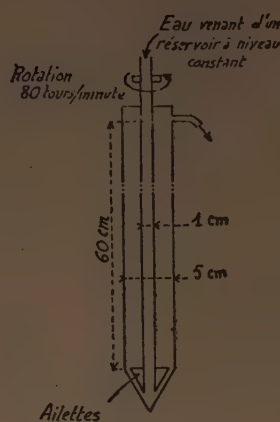


FIG. 9.

Dans les expériences sur le quartz (< 0,074 mm) les vitesses choisies étaient :

0,012, 0,048 et 0,192 cm/s. Les opérations duraient respectivement 320, 120 et 40 mn (ce qui correspond à un rendement d'environ 90 %).

En utilisant la loi de STOKES corrigée

$$d = \sqrt{\frac{10,6\mu v}{g\delta}}$$

(que nous avons vue plus haut au n° 10), ces vitesses correspondent respectivement à :

$$d = 0,0009 \quad 0,0018 \quad 0,0036 \text{ cm}$$

(La formule de STOKES non corrigée donne 0,0012, 0,0023, 0,0046 cm.)

## III. — MESURE DE LA SURFACE DES FRAGMENTS

## A. — MÉTHODES DIRECTES

 1<sup>o</sup> DISSOLUTION

## a) Principe.

14. — La méthode repose sur la loi de Wenzel : La vitesse de réaction entre solides et liquides est proportionnelle à la surface de contact.

Elle n'est valable que pour un corps chimiquement homogène.

Certains auteurs ont prétendu que la loi de WENZEL devait être modifiée pour les particules très fines. Cependant la méthode de dissolution du quartz par l'acide fluorhydrique a permis de vérifier la loi de Rittinger (que nous étudierons au chapitre IV) avec une précision telle qu'on peut dire que les deux lois se prouvent mutuellement.

(La réaction ne doit pas donner de produits gazeux, sous peine d'entraîner des difficultés mécaniques. Elle ne doit pas non plus donner des produits qui cachent la surface des fragments.)

On prend comme liquide une solution faiblement concentrée; sinon les particules fines seraient trop vite dissoutes.

En portant sur un graphique (fig. 10) : en abscisse les temps de réaction, et en ordonnée le pourcentage de solide dissous :

$$C = \frac{P(\text{dissous})}{P(\text{initial})} \times 100$$

on obtient une courbe (C) dont la courbure dépend de la variation de la surface du solide et de la concentration de la solution.

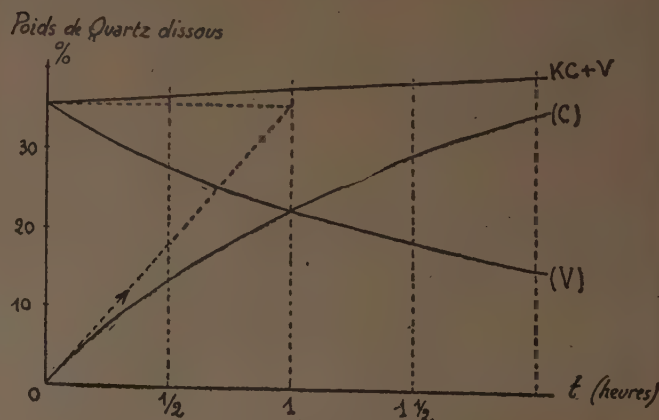


FIG. 10.

La tangente à l'origine de cette courbe est la *vitesse initiale de dissolution*. Elle est proportionnelle à la surface initiale des fragments (pour une concentration et une température données).

(La réaction ne doit pas être autocatalytique; sinon cette tangente serait mal déterminée.)

On obtient en principe la surface initiale en comparant la vitesse initiale trouvée à la vitesse initiale de dissolution d'une éprouvette géométriquement définie.

### b) Application au quartz.

GROSS prend une solution de 73,2 g d'acide fluorhydrique par litre d'eau. Il opère sur 1 ou 2 g de quartz broyé, dans un tube de bakélite, muni d'un agitateur (pour éviter le tassement).

La réaction dure 30 mn, 1 h, 1 h 30 mn et 2 h. Elle est arrêtée chaque fois par un lavage rapide.

Le pourcentage moyen de quartz dissous par heure est :

$$V = \frac{C}{t}$$

( $t$  étant la durée de la réaction en heures).

Soit (V) la courbe représentative de V.

Des deux courbes (C) et (V), la première est convexe vers les ordonnées, et la seconde est concave. Cela suggère la possibilité de les combiner pour avoir une droite. (L'expérience justifie d'ailleurs cette suggestion, même pour une réaction de 7 ou 8 h) :

$$KC + V = at + V_0$$

On détermine les constantes K,  $a$ ,  $V_0$  au moyen de trois mesures pour 30 mn, 1 et 1 h 30 mn par exemple. [La quatrième mesure (2 h) sert de vérification.]

$$\text{On en déduit } V_0 = \frac{100}{P} \frac{dp}{dt}$$

On ne peut pas obtenir la surface de l'échantillon en comparant  $V_0$  à la vitesse initiale de dissolution d'un cube de quartz, car le cristal de quartz ne se dissout pas également dans toutes les directions. Si S est la surface spécifique cherchée, la loi des grands nombres permet cependant de dire que  $V_0$  est proportionnel à S. On obtient le coefficient de proportionnalité en appliquant la méthode à des cristaux de quartz taillés de surface mesurable [par exemple par argenture (n° 17)]. (On ne peut pas utiliser des fragments concassés car ils présentent, comme nous le verrons plus loin, des surfaces internes qu'on ne pourrait pas mesurer.)

Pour les conditions indiquées ci-dessus, on trouve :

$$S \text{ cm}^2/\text{g} = 170 V_0$$

Les erreurs maxima à craindre au cours de l'opération sont :

une perte de poids pendant la manipulation :	erreur < 2 %
une erreur de 10 s sur le temps de réaction :	— < 0,6 %
une erreur de 0,1° sur la température :	— < 0,5 %
une erreur de 0,25 % sur la concentration :	— < 0,4 %

L'erreur opératoire probable ne dépasse donc pas 1 % mais il est possible que certaines surfaces internes ne soient pas atteintes par la solution, ce qui peut entraîner une erreur un peu supérieure pour la mesure de la surface totale.

### c) Autres applications.

1) Verre : On le dissout par un mélange de carbonate de sodium et de soude caustique, à 95°.

2) Calcite : On la dissout par une solution d'acide chlorhydrique.

### 2° FORCE COERCITIVE (pour la magnétite).

15. — GOTTSCHALK a découvert que la force coercitive de la magnétite est proportionnelle à sa surface. DAVIS et HARTENHEIM en ont déduit la méthode suivante :

L'échantillon est introduit dans un petit tube après avoir été aimanté. Il est maintenu par deux bouchons de caoutchouc (fig. 11).

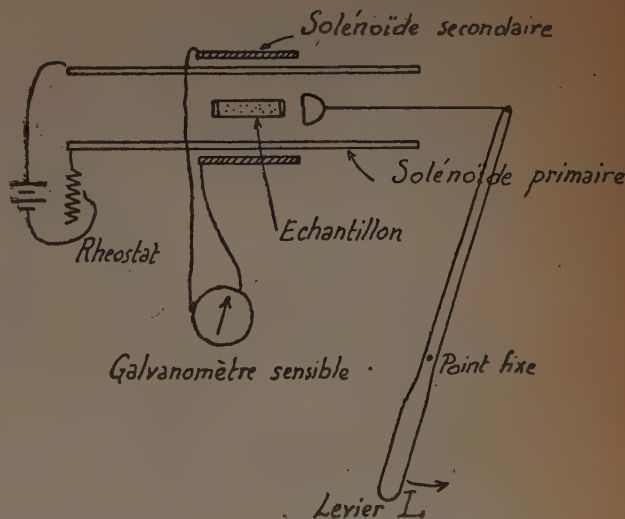


FIG. 11.

Une impulsion vive donnée au levier L chasse l'échantillon du solénoïde primaire et fait dévier le galvanomètre. à moins de la présence d'un champ coercitif (de désaimantation) dans le primaire. On règle ce champ par un rhéostat sur le circuit des accu. On fait au moins trois essais avec les intensités  $i_1, i_2, i_3$  de façon à obtenir trois déviations  $e_1, e_2, e_3$ , du galvanomètre dont une soit de sens contraire aux deux autres. Si l'on porte sur un graphique :  $i$  en abscisse et

e en ordonnée, les trois points représentatifs sont sur une courbe qui coupe l'axe des  $i$  en  $i_0$  (fig. 12).

La force coercitive d'aimantation de l'échantillon (pro-

Déviatiou du galvanomètre

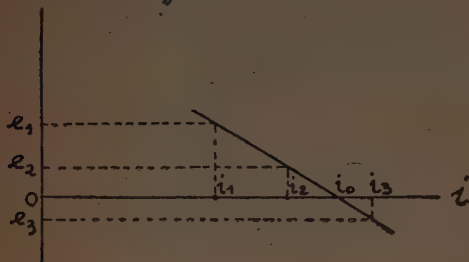


FIG. 12.

portionnelle à la surface des fragments) est  $Ci_0$  (en oersteds).

(C étant une caractéristique du primaire.)

On détermine C au moyen d'un essai sur un échantillon de surface connue.

Les deux méthodes que nous venons d'exposer (dissolution et force coercitive) sont les seules méthodes permettant actuellement de mesurer la surface d'un échantillon tout-venant avec précision.

### 3° MOUILLAGE

16. — RITTINGER a justifié la loi qui porte son nom (voir n° 91) en mouillant des fragments broyés. Ce n'était qu'une vérification sommaire basée sur l'hypothèse que la pellicule d'eau aurait eu une épaisseur constante, quelle que soit la dimension des fragments. Elle ne peut valoir que pour les pierres non poreuses.

(On a essayé beaucoup d'autres substances pour mouiller les fragments broyés, en particulier des solutions radio-actives.)

Remarque : M. BOLOMEY donne pour calculer l'eau de mouillage des agrégats du béton la formule suivante (valable à 5 % près pour  $d > 0,2$  mm) :

$$V \text{ (litres)} = \frac{PN}{\sqrt[3]{d^2}}$$

P = poids d'agrégats (en kg)

N = 0,08 à 0,13 suivant : la nature de la roche, la rugosité, la forme (les agrégats concassés exigent 10 à 20 % de plus que les agrégats roulés), la fluidité du béton.

d = dimension moyenne (en mm).

Par contre, d'après la méthode de RITTINGER, V varierait comme  $\frac{1}{d}$ . En effet,

le nombre des fragments par unité de poids varie comme  $\frac{1}{d^3}$ ,

la surface de chaque fragment varie comme  $d^2$ ,

la surface spécifique varie donc comme  $\frac{1}{d^3} \times d^2 = \frac{1}{d}$ .

### 4° ARGENTURE

17. — GROSS a utilisé l'argenture des fragments de quartz pour déterminer leur surface externe (en supposant uniforme l'épaisseur de la pellicule d'argent).

La méthode de dissolution donne, par contre, la somme des surfaces externe et interne (fêlures) résultant de la fragmentation : des fêlures, invisibles initialement, apparaissent pendant cette dissolution et entraînent même la division des fragments.

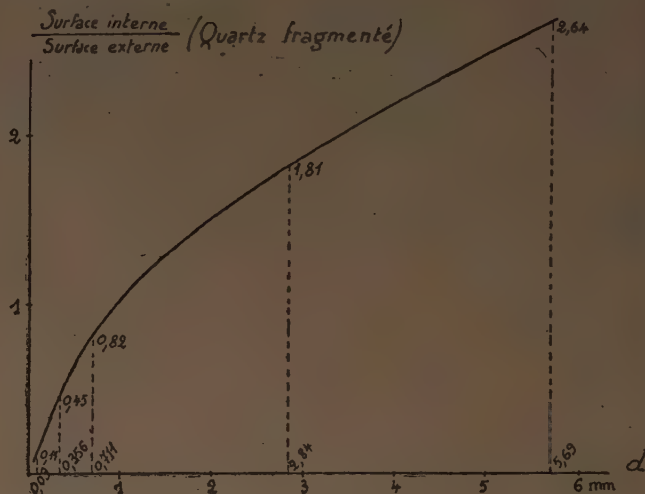


FIG. 13.

On voit sur le graphique (fig. 13) que la surface interne est d'autant plus prépondérante que les fragments sont plus gros.

### 5° ADSORPTION

18. — On a signalé plusieurs méthodes, plus ou moins précises, permettant de calculer la surface de fragments en leur faisant adsorber diverses substances : en particulier l'argon, à basse température.

## B. — MÉTHODES INDIRECTES

### 19. — 1° CALCUL DE LA SURFACE PAR LA DIMENSION DES FRAGMENTS.

#### a) Classement des fragments.

On mesure la dimension des fragments de l'échantillon étudié par les méthodes exposées au paragraphe 2 ci-dessus, c'est-à-dire qu'on classe les fragments en catégories. Par exemple :

$P_1$  grammes d'échantillon sont compris entre 0,1 et 0,08 mm (tamisage);

$P_2$  grammes d'échantillon sont compris entre 0,08 et 0,063 mm (tamisage).

$P_3$  grammes d'échantillon sont compris entre 0,063 et 0,0035 (décantation), etc...

### b) Surface théorique.

On affecte à chaque catégorie une *dimension moyenne* D (Nous verrons au n° 21 le calcul de cette dimension), c'est-à-dire qu'on remplace chaque catégorie par une catégorie fictive de *même poids* constituée par des fragments de dimension uniforme D.

La surface d'un fragment *sphérique* de diamètre D serait  $\pi D^2$ .

Le poids d'un tel fragment serait  $\frac{\pi D^3}{6} \delta$  (si  $\delta$  est la densité de la roche).

Le nombre de ces fragments qui seraient contenus dans la catégorie correspondante de poids  $p$  est  $\frac{P}{\frac{\pi D^3}{6} \delta}$ .

On désigne par *surface théorique* de la catégorie la surface totale de ces fragments sphériques fictifs :

$$\frac{P}{\frac{\pi D^3}{6} \delta} \times \pi D^2 = \frac{6P}{D\delta}$$

La *surface spécifique théorique* de la catégorie est donc :

$$\frac{6}{D\delta}$$

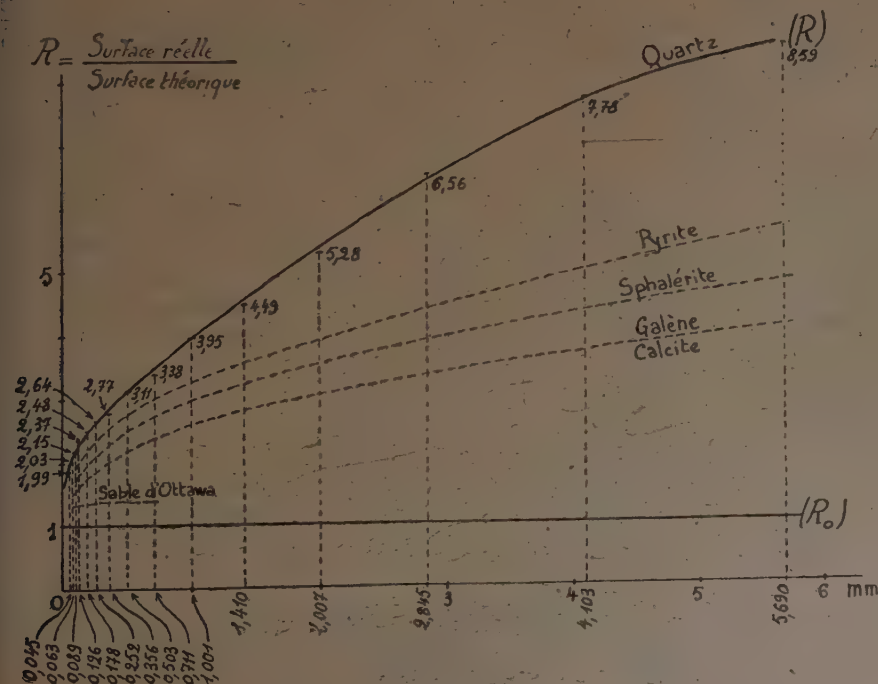


FIG. 14.

### c) Surface réelle.

Considérons le graphique (fig. 14) représentant la variation du rapport :

$$R = \frac{\text{Surface réelle}}{\text{Surface théorique}}$$

en fonction de  $d$ .

Si tous les fragments étaient sphériques et sans surface interne, la courbe représentative serait la parallèle ( $R_0$ ) à l'axe des  $d$ , d'ordonnée 1 (la courbe du sable d'Ottawa est assez proche de cette droite; son ordonnée est d'environ 1,3).

Pour le quartz, il est possible : d'une part de mesurer par dissolution la surface des fragments (broyés dans la machine à poids que nous verrons au n° 41), d'autre part, de calculer leur surface théorique en les classant en catégories (selon les méthodes vues ci-dessus au § 2), et, par conséquent, de construire la courbe ( $R$ ) avec assez de précision. Cette courbe doit passer par le point correspondant au cristal unique de quartz : prisme triangulaire dont les arêtes sont de l'ordre de  $5 \text{ \AA}$  ( $1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ cm}$ ) pour lequel  $R \approx 1,5$ .

Le quartz est une roche pour laquelle le rapport  $R$  est particulièrement élevé, parce que le coefficient volumétrique de ses fragments (n° 3) est faible, et parce qu'ils présentent une grande surface interne.

La courbe ( $R'$ ) d'une roche quelconque se trouve donc entre ( $R_0$ ) et ( $R$ ). On la trace *approximativement* en fonction de la forme des fragments et de leurs fêlures. La figure 14 montre les courbes adoptées par le Bureau des Mines des États-Unis pour quelques minerais.

La courbe du quartz a l'allure d'une parabole d'axe horizontal et de sommet

$$\begin{aligned} d &= 0 \\ R &= 1,5 \end{aligned}$$

$$\text{Posons } R_d = 1,5 + a\sqrt{d}.$$

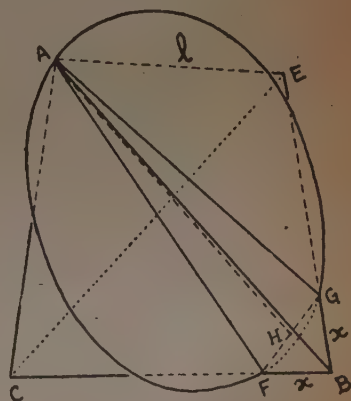


FIG. 15.

Si l'on calcule  $a$  pour tous les points connus de la courbe, on trouve les valeurs suivantes :

$d$	0,045	0,063	0,089	0,126	0,178
$a$	2,31	2,11	2,18	2,45	2,32
$d$	0,252	0,356	0,503	0,74	1,001
$a$	2,27	2,13	2,27	2,23	2,45
$d$	1,410	2,007	2,845	4,103	5,690
$a$	2,52	2,67	3,00	3,10	2,97

La moyenne des neuf valeurs de  $a$  pour  $d < 1$  mm est 2,25 et son écart probable (moyenne des valeurs absolues de l'écart) est 0,08, soit 3,5 % de la moyenne.

La moyenne des quinze valeurs de  $a$  est 2,46 et son écart probable est 0,25, soit 10 % de la moyenne.

On peut donc prendre pour  $R$  une fonction de la forme

$$R = R_1 + a\sqrt{d}$$

dont la courbe passe par le point correspondant au cristal unique.

Nous verrons l'application de ces courbes aux nos 97 et 105.

**20. — Remarque : Calcul exact de  $R$  pour quelques fragments géométriques classés grâce à des passoirs.**

1) *Sphère* :  $R = 1$ .

2) *Cube* : La dimension  $D$  du cube est la diagonale d'une face (d'après ce que nous avons dit au n° 1).

$$\text{Surface spécifique théorique} = \frac{6}{D^2}$$

$$\text{Volume d'un cube} = \frac{D^3}{2\sqrt{2}}$$

$$\text{Nombre de cubes dans un poids 1 : } \frac{2\sqrt{2}}{D^3}$$

$$\text{Surface d'un cube : } 3D^2$$

$$\text{Surface spécifique réelle } \frac{2\sqrt{2}}{D^3} \times 3D^2 = \frac{6\sqrt{2}}{D}$$

$$\text{D'où } R = \sqrt{2} = 1,41.$$

3) *Tétraèdre régulier* : Soit ABCE un tétraèdre régulier d'arête  $l$  (fig. 15), et soient F et G deux points des arêtes BC et BE respectivement, tels que BF = BG = FG =  $x$ .

Considérons le cercle circonscrit aux points AFG. Son diamètre  $y$  varie en fonction de  $x$ . Cherchons son minimum  $D$ .

$$\text{Dans le triangle AFB, } \overline{AF^2} = l^2 + x^2 - lx.$$

$$\text{Dans le triangle AHF, } \overline{AH^2} = l^2 + x^2 - lx - \frac{x^2}{4}.$$

D'où :

$$y = \frac{\overline{AF^2}}{\overline{AH}} = \frac{l^2 + x^2 - lx}{\sqrt{l^2 + \frac{3x^2}{4} - lx}}$$

Le calcul montre que :

$$\frac{dy}{dx} = \frac{3x^3 - 6lx^2 + 7l^2x - 2l^3}{4\left(l^2 + \frac{3x^2}{4} - lx\right)^{3/2}}$$

qui s'annule pour  $x = 0,3915l$ .

$$\text{D'où } D = 0,896 l.$$

Il est facile de voir que le tétraèdre passe juste dans la perforation de diamètre  $D$ .

$$\text{Surface spécifique théorique} = \frac{6}{D^2} = \frac{6}{0,896l^2}$$

$$\text{Poids du tétraèdre : } \frac{l^3}{6\sqrt{2}}$$

$$\text{Surface du tétraèdre : } l^2\sqrt{3}$$

$$\text{Surface spécifique réelle : } \frac{6\sqrt{2}}{l^3} \times l^2\sqrt{3} = \frac{6\sqrt{6}}{l}$$

$$\text{D'où } R = 2,2.$$

#### d) Calcul de la dimension moyenne.

**21. —** Considérons un échantillon tout-venant (de granulométrie continue).

Soit  $C$  le poids de tous les fragments inférieurs à une dimension donnée  $d$ , et soit (C) la courbe représentative de  $C$  en fonction de  $d$  (fig. 16).

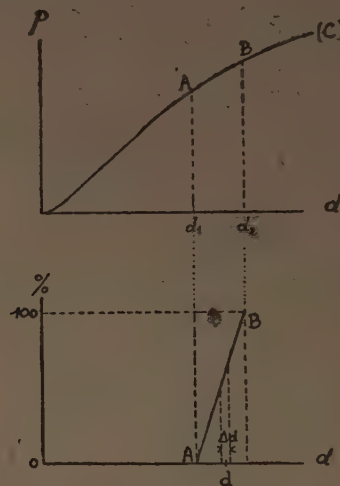


FIG. 16.

La portion de courbe AB comprise entre deux dimensions voisines  $d_1$  et  $d_2$  (définissant une catégorie) peut être confondue avec sa corde.

La courbe granulométrique (voir la définition au n° 23) de cette catégorie (de poids  $p$ ) est donc un segment AB.

L'ensemble des fragments compris entre  $d - \frac{\Delta d}{2}$  et  $d + \frac{\Delta d}{2}$  a, par conséquent, pour poids  $p \times \frac{\Delta d}{d_2 - d_1}$ .

Supposons pour simplifier que tous les fragments aient la même forme, par exemple sphérique.

Chaque fragment pèse  $\frac{\pi d^3}{6} \delta$  et a pour surface  $\pi d^2$ .

L'ensemble des fragments compris entre  $d - \frac{\Delta d}{2}$  et  $d + \frac{\Delta d}{2}$  a donc pour nombre :

$$\frac{p \times \frac{\Delta d}{d_2 - d_1}}{\frac{\pi d^3}{6} \delta}$$

et pour surface :

$$\frac{\frac{p \Delta d}{d_2 - d_1}}{\frac{\pi d^3}{6} \delta} \times \pi d^2 = \frac{6p \Delta d}{(d_2 - d_1) d \times \delta}$$

La surface totale de la catégorie est :

$$(1) \sum_{d_1}^{d_2} \frac{6p \Delta d}{(d_2 - d_1) d \times \delta} = \frac{6p}{(d_2 - d_1) \delta} \int_{d_1}^{d_2} \frac{\Delta d}{d} = \frac{6p}{(d_2 - d_1) \delta} \log_e \frac{d_2}{d_1}$$

Si la catégorie était constituée par des sphères identiques de diamètre  $D$ , la surface de ces sphères serait la « surface théorique » (n° 19) :

$$(2) \frac{6p}{D \delta}$$

En comparant les relations (1) et (2), on voit qu'il faut prendre :

$$D = \frac{d_2 - d_1}{\log_e \frac{d_2}{d_1}} \text{ (formule de LASCHINGER)}$$

(c'est la moyenne logarithmique de  $d_1$  et  $d_2$ ).

Si les dimensions  $d_1$  et  $d_2$  sont assez voisines,  $D$  diffère peu de la moyenne arithmétique.

Exemple : Tamis en progression géométrique de raison 2.

$$d_2 = 2d_1 \\ D = \frac{2d_1 - d_1}{2,3026 \times 0,30103} = d_1 \times 1,443.$$

$$\text{Surface de la catégorie : } S = \frac{6p}{d_1 \delta \times 1,443}$$

Si l'on prend la moyenne arithmétique  $d_1 \times 1,5$ , on trouve comme surface  $\frac{6p}{d_1 \delta \times 1,5}$ .

On commet donc une erreur de :

$$\frac{1,443}{1,5} - 1 = -4 \%$$

L'erreur est d'autant plus forte que la raison de la progression géométrique des tamis est plus grande.

Des essais pratiques ont confirmé cette théorie.

## 2° TURBIDITÉ

Voir le turbidimètre de WAGNER (n° 12).

## 3° PERMÉABILITÉ

22. — Une couche *horizontale* de particules fines est perméable aux fluides, d'autant plus que les particules sont plus grosses.

Une relation empirique de CARMAN donne directement la surface spécifique d'une poudre :

$$S = \sqrt{\frac{g}{kKu} \frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2}}$$

$g = 981 \text{ cm/s}^2$ ;

$\varepsilon =$  porosité de la poudre (tassée d'une façon déterminée);

$k =$  constante;

$K =$  perméabilité : vitesse du fluide en centimètres par seconde pour une dépression unité et pour une couche de poudre de 1 cm;

$u =$  viscosité du fluide.

Cette méthode est applicable pour :

$$S > 1\,000 \text{ cm}^2/\text{g} \text{ si le fluide est liquide;} \\ S > 4\,000 \text{ — — — gazeux.}$$

Les gaz sont préférables, car les liquides sont adsorbés et bouchent les pores de la poudre.

## IV. — REPRÉSENTATIONS GRAPHIQUES

### A. — COURBE GRANULOMÉTRIQUE CUMULATIVE

23. — Au cours des chapitres suivants, nous construirons en principe les courbes granulométriques en portant en abscisse  $d$  des fragments, et en ordonnée les pourcentages  $p$  en poids (ou en volume) des fragments de l'échantillon dont la dimension est inférieure à  $d$ .

On obtient ainsi une courbe (C) (fig. 17).

### B. — COURBES DE FRÉQUENCE

24. — Considérons  $n$  écarts de dimension, limités par  $d_1 d_2 d_3 \dots d_k \dots$  en progression arithmétique ou géométrique.

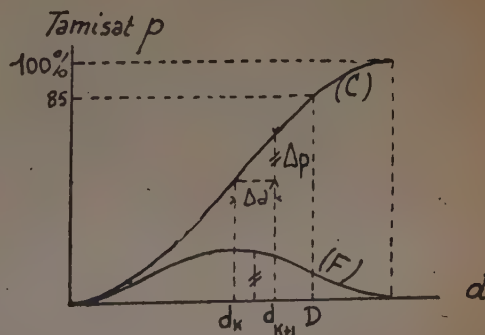


FIG. 17.

Entre  $d_k$  et  $d_{k+1}$ , il existe un nombre  $\Delta N$  de fragments, leur surface est  $\Delta S$ , leur volume est  $\Delta V$ , leur poids est  $\Delta P$ .

Si nous portons en abscisse :  $\frac{d_k + d_{k+1}}{2}$  et en ordonnée :  $\Delta N$  ou  $\Delta S$  ou  $\Delta V$  ou  $\Delta P$ , on obtient les courbes de fréquence des fragments.

En particulier, si l'on prend  $d_1 d_2 d_3 \dots$  en progression arithmétique de raison  $\Delta d$  (intervalle élémentaire), la courbe  $\Delta P$  (ou  $\Delta V$ ) est la courbe (F) dérivée de la courbe (C). En effet,  $\Delta P = \frac{\Delta P}{\Delta d} \times \Delta d$  est proportionnel à  $\frac{\Delta P}{\Delta d}$  si  $\Delta d$  est fixé.

**Remarque :** Le rendement d'un criblage est évidemment d'autant plus élevé que l'ordonnée de la courbe (F) au point correspondant est plus faible, c'est-à-dire que la pente de la tangente à la courbe granulométrique est plus faible.

#### C. — DIMENSION DU PRODUIT TOUT-VENANT SORTANT D'UN APPAREIL DE FRAGMENTATION

25. — Par définition, c'est la dimension D correspondant à une ordonnée 85 % de la courbe granulométrique (C).

Si l'on prenait pour dimension du produit l'abscisse correspondant à 100 %, on risquerait d'avoir la dimension d'un fragment exceptionnellement grand plutôt que la dimension représentative cherchée.

[Cette définition est un peu différente de la définition d'un agrégat type (vue au n° 2).]

#### D. — MODULE DE FINESSE D'UN ÉCHANTILLON

26. — C'est un facteur proportionnel à la somme des refus de l'échantillon sur des tamis en progression géométrique.

Si l'on porte en abscisse une échelle logarithmique, le module de finesse est, par exemple, proportionnel à l'aire hachurée sur la figure 18.

Aux États-Unis, on utilise neuf tamis correspondant à peu près aux tamis français de modules 22, 25, 28, 31, 34, 37, 40, 43 et 46.

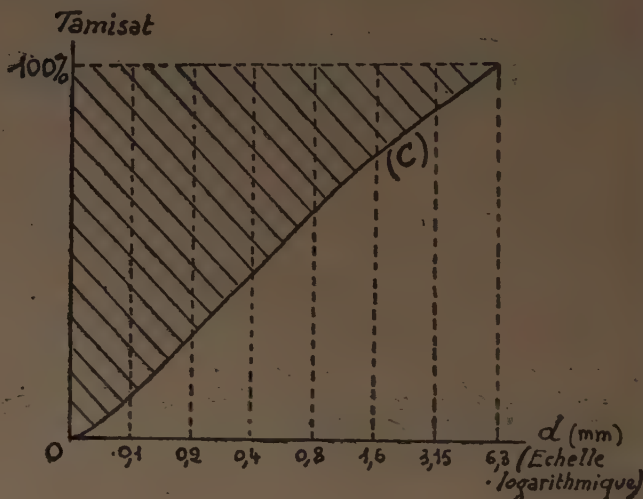


FIG. 18.

## CHAPITRE II

### CARACTÉRISTIQUES DES ROCHES

La pétrographie est une science très vaste qui relève de spécialistes. Cependant, il nous a paru nécessaire d'en faire une brève synthèse, une sorte d'aide-mémoire, en tête de ce chapitre.

Les différentes caractéristiques ne seront pas toutes traitées sur un pied d'égalité. Nous les citerons à peu près toutes, mais nous étudierons plus longuement les caractéristiques mécaniques qui intéressent particulièrement la fragmentation.

#### I. — CARACTÉRISTIQUES MINÉRALOGIQUES ET CHIMIQUES

##### A. — PRINCIPAUX CONSTITUANTS DES ROCHES

27. — Le quartz : silice ( $\text{SiO}_2$ ).

Le calcaire : carbonate de calcium ( $\text{CO}_3\text{Ca}$ ).

Le feldspath : silicate d'alumine et d'un métal alcalin (exemple : orthose  $6\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ).

L'argile : silicate d'alumine hydraté (exemple : Kaolinite  $2\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $2\text{H}_2\text{O}$ ).

Le mica : silico-aluminate de potassium.

L'amphibole : silicate de chaux et de magnésie.

Le pyroxène : silicate de chaux, magnésie et fer. (La marne est un calcaire argileux.)

Certaines roches contiennent aussi des métaux ou des métalloïdes sous forme d'oxydes, de sulfures, etc... (minerais).

D'autres contiennent surtout du carbone (houille).

##### B. — PRINCIPALES CATÉGORIES DE ROCHES

###### 1° Roches calcaires.

28. — Elles sont constituées essentiellement par du calcaire comme leur nom l'indique (exemple : le marbre).

Certaines contiennent aussi de la silice.

###### 2° Roches siliceuses.

Silex : quartz impurs.

Grès : grains quartzeux ou feldspathiques liés par un ciment (siliceux, calcaire, feldspathique, argileux ou micacé).

Granites : mélanges de feldspath, quartz et mica. (Les gneiss sont des granites à structure schisteuse.)

Syérites, diorites, ophites : feldspath et amphibole.

Diabases, trapps : feldspath et pyroxène.

Porphyres : cristaux de feldspath noyés dans une gangue quartzeuse, feldspathique ou amphibolique.

Pierres volcaniques (basaltes, etc...).

##### C. — STRUCTURES

29. — Leurs principales désignations sont les suivantes :

Adélogène : pas de grains discernables.

Oolithique : rappelle des œufs de poisson gros comme des grains de millet.

Pisolitique : rappelle des œufs de poisson gros comme des pois.

Compacte : tissu très serré.

Vacuolaire : nombreuses cavités.

Spongieuse.

Caverneuse.

Bréchiforme : fragments anguleux.

Porphyrique : cristaux disséminés dans une pâte homogène.

Cristalline : grains luisants.

Demi-cristalline : mélange de parties cristallines et amorphes.

Vitreuse.

Fibreuse : aiguilles fines et serrées.

Feuilletée : étages minces.

Schisteuse : étages.

Amygdaloïde : parties arrondies.

##### D. — CASSURES

30. — On les examine à la loupe ou au microscope. Leur aspect dépend de la structure de la roche.

Leurs principales désignations sont les suivantes :

Plate.

Ondulée { vallonée;  
ridée;  
mamelonnée.

Anguleuse : à angles plus ou moins vifs.

Tectiforme : en forme de toiture.

Rugueuse.

Conchoïdale : forme extérieure des coquilles.

Grenue : grains fins (0,3 à 0,8 mm).

Gréseuse : grains moyens (1 à 2,5 mm).

Granuleuse : gros grains (3 à 7 mm).

Esquilleuse.

Ecailleuse.

Lisse.

## II. — CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES

### A. — DENSITÉ

$$1^{\circ} \text{ DENSITÉ APPARENTE} = \frac{\text{POIDS À SEC}}{\text{VOLUME APPARENT}}$$

a) Poids.

31. — Il se mesure après dessiccation à 40°.

b) Volume.

Si l'éprouvette a une forme géométrique on mesure ses dimensions au pied à coulisse.

Si l'éprouvette est irrégulière, on peut l'imbiber préalablement d'eau puis calculer la différence : (poids dans l'air — poids dans l'eau), ou bien on peut mesurer le volume d'eau qu'elle déplace.

Si la roche réagit sur l'eau (ciment), on utilise généralement un autre liquide, non réactif.

Exemples : Calcaires .....	0,8 à 2,7
Grès .....	1,9 à 2,7
Granites .....	2,3 à 2,9

### 2° POIDS SPÉCIFIQUE

C'est le poids de l'unité de volume plein.

On l'obtient en appliquant la méthode exposée ci-dessus pour la densité apparente, à 30 g de roche, pulvérisées de façon à passer au tamis de module 23 (équivalent à 0,2 mm).

### B. — POROSITÉ

32. — La porosité est le rapport :  $\frac{\text{volume des vides}}{\text{volume apparent}}$

c'est-à-dire :  $\frac{\text{poids, après imbibition} - \text{poids à sec}}{\text{volume apparent}}$  ou  $\frac{\text{poids après imbibition} - \text{poids à sec}}{\text{poids à sec}} \times \text{densité apparente.}$

### 1° POROSITÉ « ABSOLUE »

Elle se déduit de la densité apparente  $d$  et du poids spécifique  $\delta$ .

En effet, en prenant un « poids à sec » = 1 dans la formule, on a :

$$\text{Porosité} = \frac{\delta - d}{\delta}$$

### 2° POROSITÉ « RELATIVE »

a) A l'eau froide.

On trempe l'éprouvette dans l'eau progressivement, puis on la pèse tous les jours jusqu'à ce qu'elle ait un poids constant.

Pour accélérer l'essai, on peut placer l'éprouvette préalablement dans le vide (pression 20 mm de mercure), puis l'imbiber d'eau, sous pression (150 atmosphères).

b) A l'eau bouillante.

L'eau contenant l'éprouvette est portée progressivement à l'ébullition. Celle-ci est maintenue pendant 2 h.

Exemples : Calcaires .....	0,1 à 45 %
Grès .....	0,1 à 23 %
Granites .....	0,05 à 0,2 %

### C. — HYGROSCOPICITÉ

Elle caractérise l'absorption d'eau par capillarité.

### D. — ÉLASTICITÉ

33. — Loi de Hooke :  $\frac{\Delta l}{l} = \frac{F}{E}$

$l$  = longueur d'une éprouvette prismatique droite;  
 $\Delta l$  = variation de cette longueur;  
 $F$  = contrainte appliquée perpendiculairement à une base;  
 $E$  = module d'élasticité.

Exemple : Compression :

Calcaires .....  $E = 0,5 \times 10^5$  à  $8 \times 10^5$  kg/cm<sup>2</sup>  
 Grès .....  $0,3 \times 10^5$  à  $4 \times 10^5$   
 Granites .....  $1 \times 10^5$  à  $6 \times 10^5$

## E. — DILATATION THERMIQUE

$$l = l_0 (1 + \alpha t).$$

Exemples : Calcaires ..  $\alpha = 6$  à  $10 \times 10^{-6}$   
 Grès .....  $9$  à  $12 \times 10^{-6}$   
 Granites...  $10$  à  $12 \times 10^{-6}$

## III. — CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

### A. — HOMOGENÉITÉ

(Nous avons groupé les essais d'homogénéité dans ce paragraphe bien qu'ils ne découlent pas tous des caractéristiques mécaniques.)

#### 1° HOMOGENÉITÉ CHIMIQUE

34. — On polit une face plane de la roche et l'on forme tout autour un rebord de mastic. On verse dans la cuvette ainsi formée un acide convenable (par exemple de l'acide chlorhydrique dilué pour les pierres calcaires) qu'on change fréquemment. Au bout de quelques jours on peut juger l'homogénéité.

#### 2° HOMOGENÉITÉ PHYSIQUE

Elle découle des caractéristiques physiques énumérées au paragraphe 2. Par exemple, quand on trempe une face d'une éprouvette cubique dans l'eau, si la roche est homogène, l'eau monte également le long de toutes les faces verticales.

#### 3° HOMOGENÉITÉ MÉCANIQUE

Elle découle des caractéristiques mécaniques qui seront étudiées dans ce troisième paragraphe.

##### a) Observation de la cassure.

On dit qu'une roche est *structuralement homogène* si la rupture a lieu indistinctement au travers des grains ou des cristaux et du ciment qui les lie.

Si la roche est *structuralement hétérogène*, la rupture a lieu de préférence dans le ciment.

##### b) Les entailles

au couteau tout le long de l'arête d'une pierre calcaire taillée donnent une idée de son homogénéité.

##### c) L'essai Brinell

consiste à appuyer une bille d'acier à différents endroits de la roche avec une pression convenable, en interposant

une lame de clinquant de 0,05 mm d'épaisseur. On mesure le diamètre de l'empreinte sur cette lame. Une roche homogène donne des empreintes constantes.

##### d) Jet de sable.

On dirige le jet sur une face plane de la roche pendant 2 mn, sous une pression de 3 atmosphères. Une roche homogène donne une usure constante.

### B. — RÉSISTANCE A LA COMPRESSION, A LA TRACTION, A LA FLEXION, AU CISAILEMENT

#### 1° RÉSISTANCE A LA COMPRESSION

35. — Elle se mesure sur des cubes de 4 à 10 cm d'arête (suivant que la résistance est plus ou moins élevée) dont deux faces (parallèles au lit en principe) sont parfaitement dressées.

On interpose entre les plateaux de la presse et le cube des feuilles de carton sec de 2 mm d'épaisseur environ.

En principe on écrase les éprouvettes sèches.

La pression doit augmenter de 12 à 15 kg/cm<sup>2</sup>/s.

#### Raccourcissement de rupture

Prenons par exemple, un grès ayant pour résistance à la compression 1 000 kg/cm<sup>2</sup> et pour module d'élasticité en compression  $3 \times 10^5$  kg/cm<sup>2</sup>. A la rupture, on a :

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{F}{E} = \frac{1\,000}{3 \times 10^5}$$

(en admettant que le module d'élasticité reste constant).

Le raccourcissement de rupture est donc environ  $\frac{3}{1\,000}$ .  
 (Il est donc nécessaire qu'un plateau de la presse soit monté sur rotule pour que la pression soit bien répartie.)

Remarque : Si l'on graisse les plateaux de la presse, la résistance de l'éprouvette est plus faible (elle peut être réduite de moitié).

(Cette résistance serait beaucoup plus caractéristique.)

**Exemples :**

Calcaires .....	20 à 2 000 kg/cm <sup>2</sup>
Grès .....	100 à 3 000 —
Granites .....	200 à 2 500 —
Porphyres .....	1 500 à 3 000 —
Basaltes .....	1 000 à 4 000 —

**2° RÉSISTANCE A LA TRACTION**

Elle est en moyenne 1/10 de la résistance à la compression.

On la mesure directement, ou bien on la déduit d'un essai de rupture par flexion d'un prisme à base rectangulaire.

**3° RÉSISTANCE A LA FLEXION**

On peut la mesurer par exemple en chargeant progressivement une éprouvette parallélépipédique de 2 × 2 × 12 cm, posée sur deux couteaux distants de 10 cm, jusqu'à la rupture.

**4° RÉSISTANCE AU CISAILEMENT**

Sa valeur est généralement voisine de celle de la résistance à la traction.

On la mesure en exerçant une pression latérale, progressive, sur une éprouvette encastrée, et à une faible distance de l'encastrement, jusqu'à la rupture. (Si cette distance est trop forte, il y a rupture par traction et non par cisaillement.)

On peut aussi déduire la résistance au cisaillement de la rupture par torsion d'une éprouvette cylindrique.

**36. — C. — RÉSISTANCE A LA PÉNÉTRATION OU DURETÉ**

**1° ESSAI DE RAYURE**

**a) Échelle de Mohs.**

0 : liquide;	6 : feldspath;
1 : talc;	7 : quartz;
2 : gypse;	8 : topaze;
3 : calcite;	9 : corindon;
4 : spath fluor;	10 : diamant.
5 : apatite;	

**Exemples :** Le degré de dureté de l'argile est 1,5 (l'argile raye le talc et il est rayé par le gypse).

Ongle, galène .....	2,5
Dolomie .....	4
Verre .....	5
Silex .....	5,5
Cassitérite (minéral d'étain) .....	6,5

**b) Échelle E. P. C.**

(Pour les calcaires destinés aux chaussées)

- a : mine de plomb;
- b : plomb (1,5 dans l'échelle de Mohs);
- c : alliage fusible plomb-étain;
- d : zinc (3 dans l'échelle de Mohs);
- e : laiton recuit;
- f : bronze d'aluminium recuit;
- g : acier (5,5 dans l'échelle de Mohs).

Un calcaire *tendre* se classe entre (b) et (c), un calcaire *dur* entre (e) et (f).

**c) Seléromètre de Martens.**

C'est un diamant conique d'angle au sommet 90°.

On le charge jusqu'à ce qu'on obtienne sur la roche à essayer des stries de 0,01 cm de largeur.

Le poids de la charge est proportionnel à la dureté.

**2° POINÇONNEMENT**

On polit une face de la roche et l'on y appuie progressivement un cube d'acier de 2 cm d'arête jusqu'à ce qu'on obtienne une empreinte appréciable.

La charge est proportionnelle à la dureté.

**D. — RÉSISTANCE A L'USURE**

**37. —** La meule Dorry comprend une piste circulaire horizontale en fonte tournant à 2 000 tours/heure.

On y appuie l'éprouvette prismatique de 6 × 4 × 12 cm pendant 2 h (1 h sur chaque extrémité), à 26,1 cm du centre, avec une pression de 250 g/cm<sup>2</sup>, en interposant du sable de Fontainebleau compris entre les tamis de modules de 20 et 26 (équivalents aux passoirs d'ouvertures 0,1 et 0,4 cm) (1 litre tous les 1 000 tours).

Après l'essai, on mesure l'usure.

<b>Exemples :</b> Calcaires durs ....	1,5 à 10 cm
Grès .....	0,4 à 0,8
Granites .....	0,7 à 2
Porphyres .....	0,5 à 1
Silex .....	0,15

Aux États-Unis et en Angleterre, on mesure la perte de poids d'une éprouvette cylindrique.

En Allemagne, on mesure la perte de volume d'une éprouvette à base carrée.

**E. — ABRASIVITÉ**

**38. —** On peut dire que c'est la caractéristique complémentaire de la résistance à l'usure.

Elle est importante à considérer pour choisir les appareils de fragmentation et le métal de leurs surfaces broyantes.

Elle dépend de la composition cristallographique de la roche. Par exemple les cristaux de quartz sont particulièrement abrasifs; les roches dont les cristaux sont enchevêtrés sont plus abrasives que celles dont les grains sont isolés et mal cimentés.

Pour le concassage des pierres dures, la consommation totale d'acier varie de 0,2 à 1 kg/t produite.

## F. — RÉSISTANCE AU CHOC OU TÉNACITÉ

39. — C'est une caractéristique essentielle pour la fragmentation des roches.

C'est souvent aussi celle qui sert de critère aux spécifications exigées des matériaux fragmentés (ballast, gravillon routier).

Elle dépend des qualités intrinsèques de la roche, des fissures et des plans de clivage, de la forme des fragments.

### 1° ÉPROUVETTES TAILLÉES

#### a) France.

(L'essai a été abandonné par le Laboratoire des Ponts et Chaussées.) On faisait tomber sur une éprouvette cubique de 4 cm d'arête un mouton de 4,5 kg d'une hauteur de 1 m.

On notait le nombre de coups correspondant au premier éclat, à la première fissure et à l'émiettement complet: soit  $n$ .  
(En principe l'éprouvette est placée sur son lit.)

Exemples : Calcaires .....	$n = 3$ à 10
Grès et granites ...	15 à 60
Porphyres .....	25 à 85

#### b) États-Unis.

L'éprouvette est un cylindre ayant pour hauteur et pour diamètre 1 pouce (2,54 cm).

Le mouton standard de 2 kg tombe d'une hauteur de 1 cm, puis 2 cm, puis 3 cm, etc. jusqu'à l'écrasement.

#### c) Allemagne.

L'éprouvette est un cube de 4 cm d'arête. On la recouvre d'une plaque d'acier carrée, bombée sur le dessus.

Le mouton (de 58 kg) tombe d'une hauteur correspondant à 2 kgcm/cm<sup>3</sup> d'éprouvette, puis d'une hauteur double, puis triple, etc.

On note le nombre de coups  $n$  au delà duquel le rebondissement cesse de croître, et l'on définit la ténacité :

$$\frac{\text{travail de choc (en 2 kgcm)}}{\text{volume (en cm}^3\text{)}} = n(n+1)$$

[En effet, la somme d'une progression géométrique est

$$S = \frac{n(n+1)}{2}]$$

### 2° MATÉRIAUX EN FRAGMENTS

#### 40. — a) Essai de Berlin-Dahlem pour le ballast routier.

On introduit 3 kg de ballast dans un cylindre d'acier vertical de 17 cm de diamètre et 15 cm de hauteur fermé à l'extrémité inférieure. On pose dessus un piston en acier, sur lequel on fait tomber un mouton de 50 kg, d'une hauteur de 1,50 m, 50 fois.

Le coefficient de destruction est

$$\frac{m - m'}{m} \times 100$$

$m$  et  $m'$  étant les « modules de finesse » (n° 26) de l'échantillon avant et après l'essai.

Remarque : Ce coefficient caractérise la *fragilité* du matériau, caractéristique inverse de la ténacité. (Il existe également un essai statique où l'on remplace le choc du mouton par une pression de 40 t, maintenue pendant 1 mn.)

Des essais analogues sont prévus pour le ballast des chemins de fer.

#### b) Essai italien pour le gravillon routier.

Sur une piste en acier en U de 14 cm de large et de 50 cm de longueur, on répartit  $P = 500$  g de gravillons calibrés, refusés par un tamis T, et l'on y fait rouler douze fois, à une vitesse de 10 cm/s un cylindre de 50 cm de diamètre et 5 cm de largeur, pesant 400 kg. (On répartit les allées et venues sur toute la largeur de la piste.)

On crible ensuite les fragments avec  $n$  tamis d'ouvertures décroissantes en progression géométrique à partir du tamis T inclusivement. Soient  $p_1, p_2, p_3, \dots$  les refus cumulés trouvés.

On définit le coefficient de fragmentation

$$F = 100 n \left( 1 - \frac{p_1}{P} - \frac{n-1}{n} \frac{p_2}{P} - \frac{n-2}{n} \frac{p_3}{P} - \dots \right)$$

Remarque : Si cette formule ne comportait pas les coefficients  $\frac{n-1}{n}, \frac{n-2}{n}$ , etc., on aurait :

$$F = 100 n \left( 1 - \frac{p_1 + p_2 + p_3 + \dots}{P} \right)$$

Or  $p_1 + p_2 + p_3 + \dots =$  module de finesse.

Le coefficient de fragmentation est donc une sorte de module de grosseur, où l'importance des éléments fins est réduite.

#### c) Endurance.

C'est la faculté pour un gravillon routier de résister à des efforts de compression faibles mais nombreux (plusieurs fois par seconde).

## d) Machine à poids.

## 1. PRINCIPE.

41. — Cette machine est utilisée par le Bureau des Mines des États-Unis pour mesurer la ténacité du quartz et de différents minerais. Grâce à l'absence de tout frottement mécanique on peut obtenir des mesures précises. Le quartz est introduit dans la chambre de broyage après avoir été humecté d'alcool afin que les poussières produites lors de sa fragmentation ne s'échappent pas (fig. 19).

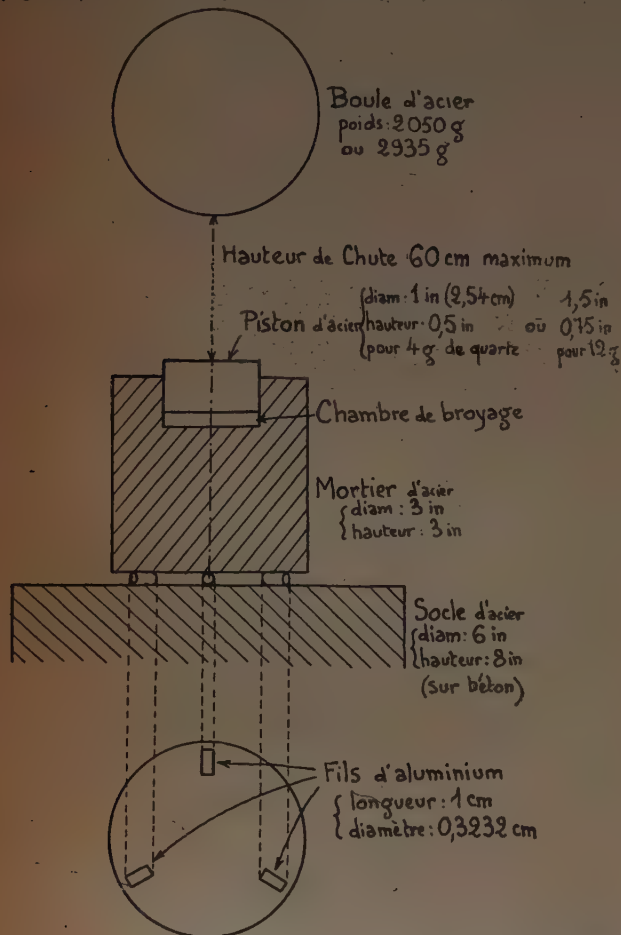


FIG. 19.

La chute de la boule provoque une déformation des fils d'aluminium placés entre le mortier et le socle, ce qui supprime tout rebondissement de la boule. Si l'essai est correct, les trois fils subissent la même déformation.

Le travail accompli par la chute de la boule est donc la somme du travail de fragmentation et du travail de déformation des fils.

**Etalonnage des fils :** On fait reposer le piston dans le fond de la chambre, après l'avoir vidée, et l'on fait tomber la boule de différentes hauteurs. Après chaque chute on mesure l'épaisseur des fils (et on les remplace par des neufs).

On peut ainsi tracer la courbe des variations de l'énergie de chute en fonction de l'épaisseur des fils : elle est légèrement concave vers les ordonnées (fig. 20).

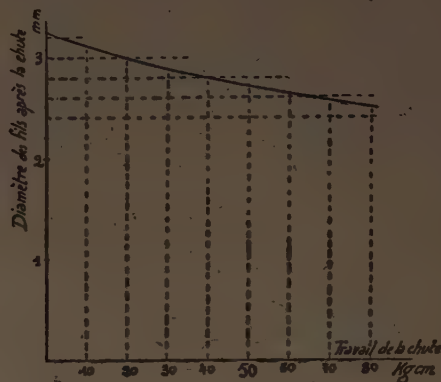


FIG. 20.

## 2. CONSTANCE DE RITTINGER C.

42. — La machine à poids a permis de prouver la loi de Rittinger : Le travail nécessaire à la fragmentation est proportionnel à la nouvelle surface produite (n° 91).

La constante de Rittinger est la surface nouvelle produite par unité de travail. Elle dépend de la roche et des conditions de la fragmentation (type de l'appareil, vitesse de marche, etc.).

Par exemple, pour le quartz, dans la machine à poids,

$$C = 17,6 \text{ cm}^2/\text{kgcm} \text{ (n° 91)}$$

**Remarque :** Le travail nécessaire pour effectuer une fragmentation donnée (c'est-à-dire une réduction donnée) sur l'unité de volume de matériau correspond à une surface nouvelle donnée : il est donc proportionnel à  $\frac{1}{C}$ .

On peut donc dire que la constante de RITTINGER est une caractéristique inverse de la ténacité (n° 39). On l'obtient grâce à des mesures de travail et de surface.

## 3. FRIABILITÉ.

Le poids de matériau obtenu en dépensant une unité de travail pour effectuer une fragmentation donnée est proportionnel à

$$P = C \times \delta$$

( $\delta$  étant la densité du matériau).

On peut dire que P mesure la friabilité.

Le bureau des Mines des États-Unis en a trouvé les valeurs suivantes :

Quartz (choisi comme référence)...	1	$\delta = 2,65$
Pyrite (sulfure de fer) .....	2,43	5,0
Calcite ( $\text{CO}_3\text{Ca}$ ) .....	4,42	2,71
Sphalérite (sulfure de zinc) .....	4,83	4,0
Galène (sulfure de plomb) .....	15,10	7,43

**Remarque :** Cette « friabilité » (grindability) est sœur de ce que nous avons appelé la « fragilité » (n° 40).

### 3° SCLÉROMÈTRE A POIDS

43. — Si l'on fait tomber une grosse bille d'acier d'une hauteur  $h$  sur un corps fragile, elle rebondit d'une hauteur  $h' < h$ . (Pour les métaux, le rapport  $\frac{h'}{h}$  est dans certaines conditions la *dureté scléroskopique*.)

L'énergie absorbée par le choc est proportionnelle à  $H = h - h'$ .

C'est le principe d'une mesure de la *résistance au broyage* des roches.

Des essais effectués aux États-Unis ont conduit à employer une bille de 1 046 g. (On a essayé aussi un marteau à pointe arrondie de 1 945 g qui donne des résultats satisfaisants. Un marteau à pointe aiguë donne une fragmentation locale excessive.)

L'échantillon doit avoir au moins 2,5 cm d'épaisseur pour que la nature de l'enclume n'ait pas d'effet.

Le rebondissement est maximum si la chute a lieu à angle droit. Il augmente avec le poli de la surface. (Certaines roches se compriment sous des coups répétés et donnent des rebondissements croissants, comme certains métaux.) Sur les bords de l'échantillon et près des criques, les rebondissements sont plus faibles, car ces endroits sont plus « fragiles ».

Si l'on porte sur un diagramme : en abscisse la friabilité de différentes roches, et en ordonnée l'énergie absorbée par le choc pour une chute de 10 pouces, les points représentatifs trouvés sont sensiblement sur une droite (fig. 21).

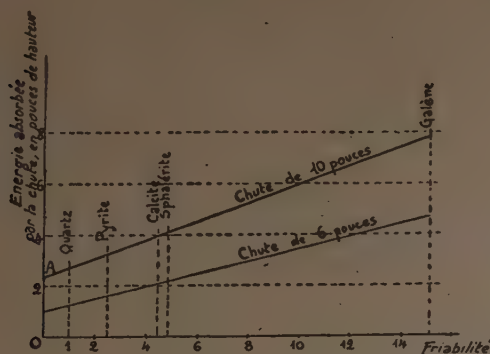


FIG. 21.

Celle-ci coupe l'axe des ordonnées en un point A correspondant à l'énergie qui serait absorbée par une roche rebelle au broyage, c'est-à-dire aux pertes d'énergie dans la bille et dans le support.

On peut déduire la friabilité d'un essai de rebondissement si l'on connaît la droite correspondant à une hauteur de chute standard (10 pouces = 25,4 cm).

Remarque : Si l'on fait varier la hauteur de chute pour une roche donnée (par exemple du quartz) et si l'on porte en abscisse

cette hauteur et en ordonnée l'énergie absorbée par le choc, on obtient une courbe OM concave vers les ordonnées (fig. 22).

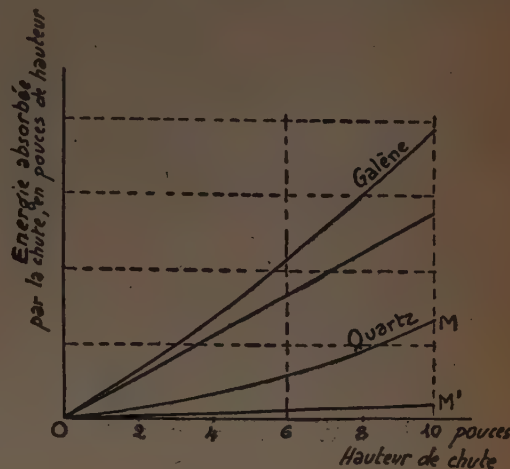


FIG. 22.

Mais si l'on corrige cette courbe OM des pertes d'énergies dues à la bille et au support, c'est-à-dire si l'on porte pour les différentes hauteurs de chute les points M' tels que  $M'M = OA$ , les points tels que M' sont sur une droite passant par l'origine.

L'énergie absorbée par la roche est donc proportionnelle à la hauteur de chute.

### G. — RÉSISTANCE A L'USURE ET AUX CHOCES RÉCIPROQUES OU QUALITÉ

#### 1° ESSAI DEVAL

44. — La machine DEVAL comprend un cylindre ayant pour longueur : 34 cm et pour diamètre : 20 cm, tournant à 2 000 tours/heure autour d'un axe horizontal faisant avec son axe un angle de 30° (fig. 23).

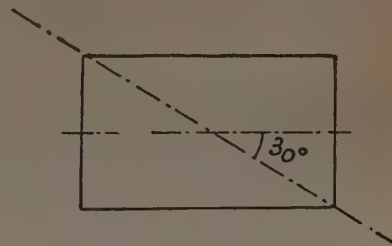


FIG. 23.

On y introduit 43 à 45 fragments pesant ensemble 5 kg (dimension comprise entre 40 et 60 mm). Après 10 000 tours on lave les fragments et l'on sépare la poussière inférieure à 1,6 mm (passeoire de module 32) : soit son poids en grammes.

Le coefficient de qualité  $Q = \frac{400}{u}$ .

Exemples :	Calcaires .....	2 à 19
	Grès .....	12 à 28
	Granites .....	7 à 20
	Porphyres .....	15 à 30

L'essai DEVAL dépend beaucoup de la forme des fragments. Par exemple, des essais sur des pierres taillées ont donné pour le coefficient de qualité les résultats suivants :

FORME DES FRAGMENTS	MARBRE	CALCAIRE	GRANITE
Plats ou allongés	12,9	13,6	19
Cubes	16,1	18	22,7
Sphères	34	44,8	173,5

Les Gravillons ne satisfont pas aux spécifications de l'essai DEVAL, puisqu'ils ne sont pas compris entre 40 et 60 mm. De nombreux essais effectués au Laboratoire des Ponts et Chaussées ont montré la nécessité d'ajouter des boulets d'acier pour mettre en évidence leur coefficient de qualité. En particulier, l'adjonction de 2 boulets de 640 g à 5 kg de gravillons a donné satisfaction, en réduisant le nombre de tours de la machine à 1 000.

## 2° MACHINE AMÉDÉE-MANNHEIM

45. — Elle comprend un tambour ayant pour diamètre 70 cm et pour largeur 45,5 cm, tournant autour de son axe (horizontal). On y introduit huit boulets de 640 g et 5 kg de gravillons (ou de ballast). L'essai dure 10 mn (à 24 tours/minute).

Un râteau élève les boulets et les laisse tomber en chute libre sur les matériaux.

On trace les courbes granulométriques avant et après l'essai. L'aire OABC (comprise entre les deux courbes) ou l'aire OADC représente le coefficient de fragmentation (fig. 24).

## IV. — RELATIONS ENTRE LES CARACTÉRISTIQUES DES ROCHES

46. — La fragmentation d'une roche dépend surtout de ses caractéristiques mécaniques, mais celles-ci dépendent elles-mêmes de ses caractéristiques physiques et minéralogiques. Par exemple, les roches vitreuses sont fragiles, les roches contenant de la silice sont abrasives, etc. Les différentes caractéristiques sont probablement liées les unes aux autres par des relations précises. Mais ces relations sont souvent mal connues.

Pour une variété bien définie, on peut dire que :

la densité;  
le coefficient d'élasticité;  
la résistance à la compression;  
la résistance à la pénétration;  
la résistance à l'usure;  
l'abrasivité;

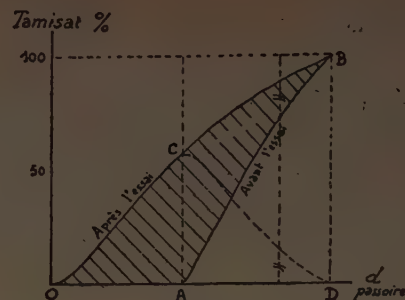


FIG. 24.

Ce coefficient est plus caractéristique que le « coefficient de qualité » qui ne représente qu'une ordonnée de la courbe OCB (correspondant à l'abscisse 1,6 mm) [Il est analogue au « coefficient de destruction » dont nous avons parlé pour la ténacité des matériaux en fragments (n° 40).]

La forme de la courbe OCB dépend de la nature de la roche.

Aux États-Unis, on utilise la machine de Los Angeles, analogue à la machine AMÉDÉE-MANNHEIM.

Diamètre du tambour....	28 in = 71 cm
Largeur .....	20 in = 51 cm
Vitesse de rotation.....	30 à 33 tours/minute
Douze boulets pesant au total.....	5 kg
Durée de l'essai .....	500 tours

## H. — ADHÉRENCE

L'adhérence aux liants est fonction de

la rugosité à l'échelle des cristaux du liant (environ 0,1 mm);  
la composition chimique;  
la porosité;  
la propreté.

[La rugosité à l'échelle du millimètre est importante pour les gravillons routiers (déravage)].

la résistance au choc;  
la résistance à la pénétration de l'eau et de l'air (inverse de la perméabilité, ou de l'hygroscopicité);  
la résistance au gel;

varient dans le même sens (la porosité varie évidemment dans le sens contraire de la densité). C'est ce qui explique qu'on parle souvent d'une roche dure ou d'une roche résistante sans autre précision.

Cependant, s'il s'agit de comparer deux variétés distinctes, par exemple un calcaire et un grès, on ne peut généralement pas prévoir de relation entre les différentes caractéristiques. (En particulier la résistance à la compression et la résistance au choc peuvent ne pas varier dans le même sens.)

## CHAPITRE III

### APPAREILS DE FRAGMENTATION

Plusieurs ingénieurs ont déjà présenté une technologie complète des concasseurs et des broyeurs. Ce chapitre n'est pas destiné à répéter leurs ouvrages. Tout en rappelant sommairement la liste et les dimensions des principaux appareils actuels, il a pour but d'étudier le mouvement des surfaces broyantes et des matériaux à fragmenter.

Afin de ne pas alourdir les raisonnements, nous n'exposerons pas les calculs en détail. Nous en donnerons surtout les principes et les résultats.

Pour rester dans un domaine réel, nous ne chercherons pas une précision excessive, et d'ailleurs illusoire. Par exemple le rayon des excentriques sera considéré comme un infiniment petit du premier ordre par rapport aux bielles.

Tous les chiffres de longueur seront en principe exprimés en mètres. La vitesse de rotation des arbres sera désignée par  $n$  en tours par minutes, et par  $\omega$  en radian par seconde ( $n = \frac{30\omega}{\pi}$ ).

#### 1. — GÉNÉRALITÉS

##### A. — SURFACES BROYANTES

47. — Elles sont en acier au manganèse ou au chrome (leur dureté BRINELL peut atteindre 550 après écrouissage).

Suivant les appareils, elles sont lisses, cannelées, ondulées ou dentelées. Pour la fragmentation des matériaux durs, les surfaces de révolution sont toujours lisses.

##### B. — ANGLE DE PRISE $\theta$

48. — Soit  $\varphi$  l'angle de frottement du matériau sur la surface broyante. La figure 25 montre qu'on doit avoir  $\theta < 2\varphi$ .

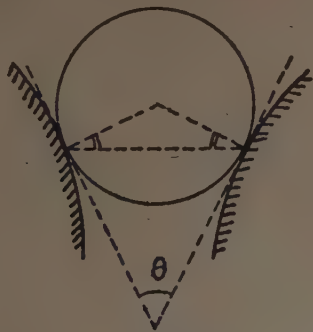


FIG. 25.

Pour des pierres sèches et propres et des surfaces lisses  $\varphi \approx 23^\circ$ ; mais ces conditions ne sont pas toujours réalisées. Aussi l'expérience fournit pour  $\theta$  les valeurs suivantes :

Roches friables .....	22 à 28°
Pierres dures .....	20 à 22°
Galets durs .....	18 à 20°

##### C. — RÉGLAGE

49. — Nous désignerons par cette expression l'écart moyen des surfaces broyantes lors de la dernière compression des matériaux, avant la sortie.

Exemple : Concasseur à mâchoires. — L'extrémité de la mâchoire mobile oscille entre deux positions GN et G'N' (fig. 26). Soit NG' parallèle à UH. La tranche de matériaux GHNU est comprimée une dernière fois en G'HN'U avant de franchir la fente

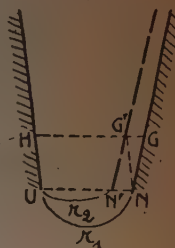


FIG. 26.

$$r = \frac{r_1 + r_2}{2}$$

D. — COURSE C (à la fente) =  $r_1 - r_2$

50. — Si les matériaux emplissent l'espace compris entre les surfaces broyantes (ce qui correspond, pour des matériaux concassés, à un volume absolu d'environ 40 % du volume apparent), la course doit être inférieure à  $(1 - 0,4)r = 0,6r$ .

Pratiquement, elle ne dépasse pas 0,3 à 0,4r.

##### E. — TAUX DE RÉDUCTION $\frac{D}{d}$

51. — D et d sont les « dimensions » respectives des matériaux à l'entrée et à la sortie (n° 25).

Pratiquement on prend souvent  $d = r$ .

## F. — CIRCUIT FERMÉ

52. — Après avoir été concassés, les matériaux peuvent être criblés et les refus renvoyés dans l'appareil. Soient :

F le pourcentage de ces refus;

q la quantité de matériaux alimentant l'appareil pendant un « temps de passe » T.

Au bout du temps nT, il y a dans l'appareil une quantité :

$$Q = q + \frac{F}{100} q + \left(\frac{F}{100}\right)^2 q + \dots + \left(\frac{F}{100}\right)^n q$$

$$\rightarrow \frac{q}{1 - \frac{F}{100}} \text{ quand } n \rightarrow \infty$$

Or Q ne peut pas dépasser la capacité  $Q_0$  de l'appareil.

Le débit maximum est donc  $P = Q_0 \left(1 - \frac{F}{100}\right)$  (fig. 27).

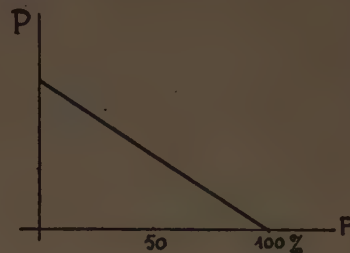


FIG. 27.

## II. — APPAREILS A MACHOIRES

## A. — MACHOIRE MOBILE A AXE FIXE

## 1° TYPE BLAKE

## 53. a) Caractéristiques.

BOUCHE  $\left\{ \begin{array}{l} \text{longueur : 0,15 à 1,50 m} \\ \text{largeur : (perpendiculaire au plan de la} \right.$

fig. 28) : 0,25 à 0,20 m

$\alpha = 5 \text{ à } 15^\circ$ .

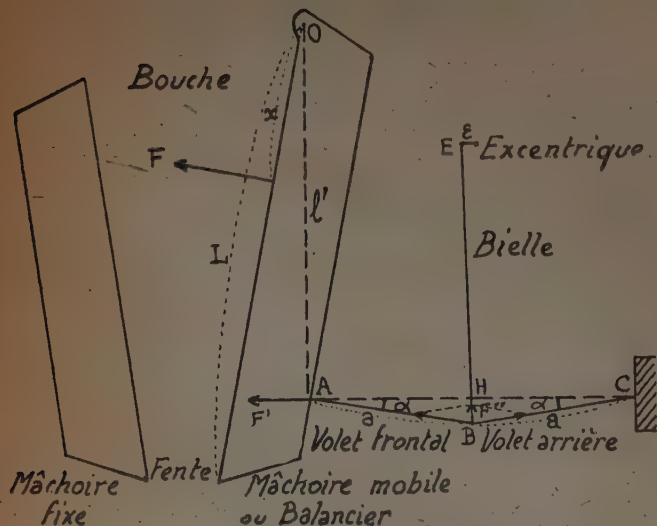


FIG. 28.

## b) Mouvement du balancier.

Nous supposons par la suite (comme c'est le cas général) :

- la bielle verticale;
- l'articulation A à la verticale de l'axe O du balancier;
- les volets AB et BC égaux;
- les articulations A et C dans le même plan horizontal.

(Les volets s'articulent en deux points très différents sur la bielle. Nous les supposons confondus en B pour ne pas alourdir les notations. Les raisonnements n'en sont nullement affectés.)

$$HB = b_0 - E \cos \omega t$$

$$CA = 2HA = 2 \sqrt{a^2 - (b_0 - \varepsilon \cos \omega t)^2}$$

$$\frac{dCA}{dt} = \frac{-2\varepsilon \omega \sin \omega t (b_0 - \varepsilon \cos \omega t)}{\sqrt{a^2 - (b_0 - \varepsilon \cos \omega t)^2}}$$

$\omega t$	0	$\frac{\pi}{2}$	$\pi$	$\frac{3\pi}{2}$	$2\pi$
$\frac{dCA}{dt}$	0	—	0	+	0
CA	$2\sqrt{a^2 - (b_0 - \varepsilon)^2}$	$2\sqrt{a^2 - b_0^2}$	$2\sqrt{a^2 - (b_0 + \varepsilon)^2}$	$2\sqrt{a^2 - b_0^2}$	$2\sqrt{a^2 - (b_0 - \varepsilon)^2}$

Nous allons chercher si le mouvement du point A est très différent d'un mouvement sinusoïdal; soit A' un point qui parcourt le même chemin que le point A avec la même période, mais d'un mouvement sinusoïdal; posons :

$$CA' = 2(c_0 + c \cos \omega t)$$

(c est le 1/4 de la course du point A dans ce calcul)

Pour

$$\omega t = 0 \quad \text{et} \quad \omega t = \pi, \quad CA^2 = CA'^2$$

$$a^2 - b_0^2 + 2b_0\varepsilon - \varepsilon^2 = c_0^2 + 2c_0c + c^2$$

$$a^2 - b_0^2 - 2b_0\varepsilon - \varepsilon^2 = c_0^2 - 2c_0c + c^2$$

D'où :

$$\begin{cases} b_0 c = c_0 c \\ a^2 - b_0^2 - c^2 = c_0^2 + c^2 \end{cases}$$

$$\overline{CA^2} - \overline{CA'^2} = 4[a^2 - (b_0 - c \cos \omega t)^2 - (c_0 + c \cos \omega t)^2]$$

$$= 4(c^2 + c^2) \sin^2 \omega t$$

$$CA = CA' \sqrt{1 + \frac{(c^2 + c^2) \sin^2 \omega t}{CA'^2}} =$$

$$CA' \left( 1 + \frac{(c^2 + c^2) \sin^2 \omega t}{2CA'^2} \right)$$

(Au deuxième ordre près) (fig. 29).

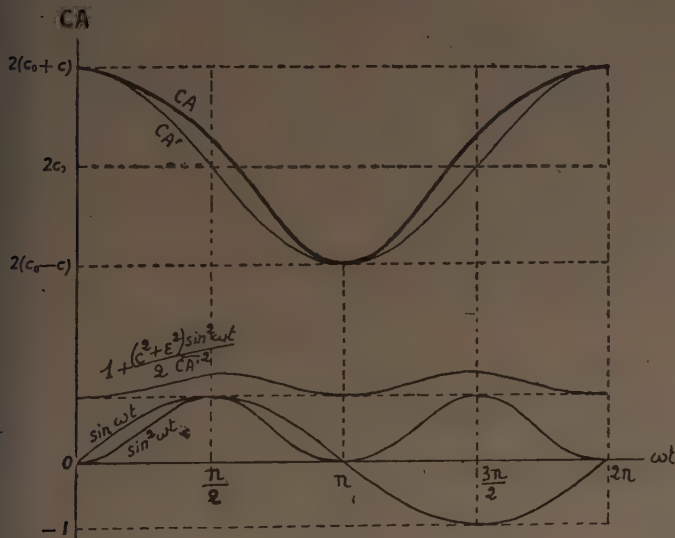


FIG. 29.

Tous les points de la mâchoire mobile ont un mouvement semblable au mouvement de l'articulation A.

Exemple :

$$\begin{cases} a = 0,85 \text{ m} \\ b_0 = 0,175 \\ c = 0,05 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \omega t = 0 & \omega t = \frac{\pi}{2} & \omega t = \pi \\ CA = 1,6815 & CA = 1,6635 & CA = 1,6393 \end{cases}$$

$$\Delta = 0,018 \quad \Delta = 0,024$$

On voit que le mouvement diffère assez peu d'un mouvement sinusoïdal.

c) Force d'écrasement.

$$F = F' \frac{l'}{x} = \frac{F''}{2 \operatorname{tg} \alpha} \times \frac{l'}{x} \text{ (fig. 28)}$$

Elle est inversement proportionnelle à  $\operatorname{tg} \alpha$  et à  $x$ .

54. — d) Descente des matériaux entre les mâchoires.

1. MACHOIRES DROITES. — Soit PQ un plan horizontal (fig. 30). L'angle de prise  $\theta$  ne dépassant guère  $22^\circ$ , la course  $PP'$  de P est sensiblement horizontale.



Soient  $P_1Q_1$  et  $P_2Q_2$  deux autres plans horizontaux tels que  $P'P_1$  et  $P'_1P_2$  soient parallèles à  $QQ_1Q_2$ .

La tranche  $PQP_1Q_1$  est comprimée en  $P'QP'_1Q_1$ . Quand la mâchoire s'écarte, elle descend au plus en  $P_1Q_1P_2Q_2$ , en se détassant c'est-à-dire en reprenant à peu près son volume apparent initial (en effet, la densité apparente des matériaux est à peu près indépendante de la grosseur des fragments). Après le coup de mâchoire suivant, elle descend encore, etc.

$$PP_1 = \frac{cx}{L\theta} \text{ (si } c \text{ est la course à la fente)}$$

$$PQ = (L_0 - x)\theta$$

Section d'une tranche  $PQP_1Q_1$  :

FIG. 30.

$$S = \frac{cx}{L\theta} (L_0 - x)\theta = \frac{cx}{L} (L_0 - x)$$

$$\frac{dS}{dx} = \frac{c}{L} (L_0 - 2x)$$

$x$	0	$\frac{L_0}{2}$	$L$	10
$S$		maximum		

Si nous considérons les tranches horizontales telles que  $PQP_1Q_1$ , leur volume va d'abord croissant, c'est-à-dire que les matériaux trouvent un volume toujours plus grand à leur disposition : les petits fragments peuvent descendre sans difficulté en se détassant, mais les gros fragments forment voûte.

Ensuite le volume des tranches décroît et la descente des matériaux est freinée par les couches inférieures. Il y a donc *surbroyage* et le débit se trouve réduit. De plus l'usure des mâchoires est plus accentuée à la fente (d'autant plus que les points de contact avec des petits fragments sont plus nombreux qu'avec des gros).

En somme, l'appareil a le même défaut qu'une installation de trois concasseurs en série dont celui du milieu débiterait plus que les deux autres.

On évite dans une certaine mesure les voûtes en élevant l'axe du balancier, c'est-à-dire en diminuant la distance  $\frac{L_0}{2} - l$ .

2. MACHOIRES A VOLUME CONSTANT. (Nous désignerons ainsi, par abréviation, des mâchoires telles que le volume des tranches  $PQP_1Q_1$  soit constant.)

a) Profil des mâchoires.

$$PP' = \frac{cx}{L} \text{ (fig. 31)}$$

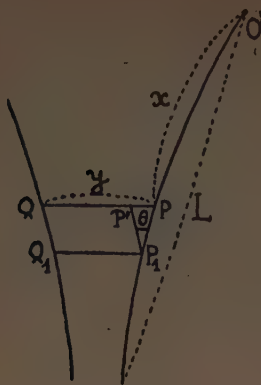


FIG. 31.

Menons comme précédemment la parallèle  $P'P_1$  à  $QQ_1$

$$PP_1 = -\frac{cx}{L} \frac{dx}{dy}$$

Pour que le volume des tranches successives soit constant, il faut que  $PP_1 \times PQ = k$ ,

$$\text{c'est-à-dire } -\frac{cx}{L} \frac{dx}{dy} y = k \text{ ou } \frac{dy}{y} = -\frac{c}{kL} x dx.$$

$$\text{D'où } y = \lambda a^{-x^2}.$$

Les constantes  $\lambda$  et  $a$  sont déterminées si l'on fixe deux éléments : longueur de la bouche et réglage.

L'expression de  $y$  rappelle l'équation bien connue de la courbe en cloche de GAUSS. Elle admet un point d'inflexion, vers le milieu des mâchoires, qu'on peut trouver en annulant la dérivée seconde :

$$\frac{dy}{dx} = \text{tg } \theta = -2\lambda \log_e a x a^{-x^2}$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = 2\lambda \log_e a (2x^2 \log_e a - 1) a^{-x^2} = 0$$

D'où :

$$x = \frac{1}{\sqrt{2 \log_e a}}$$

En ce point, l'angle de prise est maximum et ne doit pas dépasser les valeurs données au n° 48. On peut éventuellement le réduire en diminuant la « longueur » de la bouche, en augmentant le réglage ou en augmentant la hauteur du balancier.

Par contre, il n'est pas nécessaire d'élever l'axe du balancier au-dessus de la bouche.

β) *Vitesse de descente des matériaux.* — Les matériaux ne peuvent descendre que pendant la période d'écartement des mâchoires (1/2 tour d'excentrique), c'est-à-dire pendant  $\frac{30}{n}$  s. En chute libre, ils parcourraient

$$\frac{1}{2} g \frac{900}{n^2} \text{ (avec } g = 9,81 \text{ m/s}^2\text{)}$$

En réalité, les frottements réduisent leur chute à  $K \frac{450g}{n^2}$  ( $K \neq 0,75$ ).

Pour qu'ils aient le temps de parcourir la distance  $PP_1$ , il faut que :

$$K \frac{450g}{n^2} > \frac{cx}{L\theta} \text{ (fig. 31)}$$

En particulier, au point où  $PP_1$  est maximum, c'est-à-dire à la fente,

$$n^2 < K \frac{450g\theta}{c}$$

$$\text{Vitesse maxima : } n = \sqrt{K \frac{450g\theta}{c}}$$

Exemples :  $\theta = 22^\circ$ .

$$\begin{aligned} 1. \text{ Grand concasseur : } b_0 &= 0,175 \text{ m} \\ \varepsilon &= 0,05 \\ a &= 0,85 \\ c &= 0,05 \end{aligned}$$

On trouve  $n$  (maximum) = 163 tours/minute.

[Vitesse maxima de la mâchoire à la fente (n° 53)

$$v = \frac{2\pi n b_0}{60 \sqrt{a^2 - b_0^2}} = 0,057 \text{ m/s}]$$

2. Petit concasseur (10 fois plus petit)

$$n' \text{ (maximum)} = n \sqrt{10} = 515$$

$$\left[ \text{Vitesse maxima de la mâchoire } v' = \frac{v}{\sqrt{10}} = 0,018 \text{ m/s} \right]$$

e) Débit.

55. — Si  $A$  est la largeur de la bouche, le volume (apparent) d'une tranche telle que  $QPP_1Q_1$  à la fente est :

$$V = \frac{c}{\theta} (r + c) A \text{ (fig. 32)}$$

Débit en 1 h

$$60n \frac{c}{\theta} (r + c) A$$

Or la « vitesse maxima » est

$$n = \sqrt{K \frac{450g\theta}{c}}$$

D'où le débit maximum

$$P = \sqrt{1\,620\,000 K \times g \frac{c}{\theta}} (r + c) A$$

On voit que ce débit maximum est sensiblement proportionnel à la fente moyenne  $rA$  et à  $\sqrt{c}$ , et inversement proportionnel à  $\sqrt{\theta}$ .

En réalité nous verrons un peu plus loin que le débit maximum effectif est obtenu pour une vitesse supérieure à ce que nous avons appelé la « vitesse maxima » ; ce débit dépend de l'équation du mouvement du balancier.

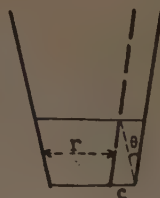


FIG. 32.

Exemples.

1. Grand concasseur à mâchoires droites (fig. 33).

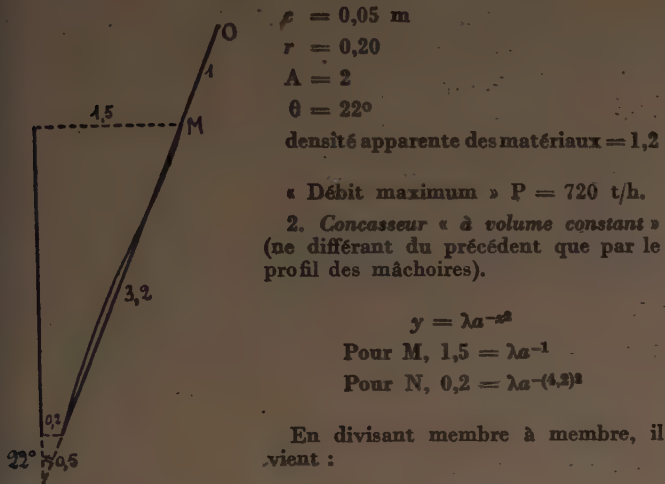


FIG. 33.

D'où :  $a = 1,13$ .

Si  $\theta$  est l'angle de prise à la fente,

$$\operatorname{tg} \theta = \left| \frac{dy}{dx} \right| = y \times 2x \log_e a = 0,205$$

D'où :  $\theta = 11^\circ 30'$

« Débit maximum »  $P' = P \sqrt{\frac{22}{11,5}} = P \times 1,38$

L'angle de prise est maximum pour  $x = \frac{1}{\sqrt{2 \log_e a}} = 2,04 \text{ m (n}^\circ 54\text{)}.$

On trouve pour cet angle  $\theta_m = 26,5^\circ$ .

Variation du débit avec la vitesse.

Si l'on dépasse la « vitesse maxima » définie précédemment, la hauteur de chute  $h$  des matériaux (à la fente) est inférieure à  $\frac{c}{\theta}$  car ils sont repris par les mâchoires en  $G''N''$  avant d'avoir pu descendre complètement (fig. 34).

Soit (C) la courbe représentative de l'écart de la fente (fig. 35).

$$h = \frac{K}{2} g t^2$$

$$= \frac{K}{2} \frac{g}{\omega^2} (\omega t)^2$$

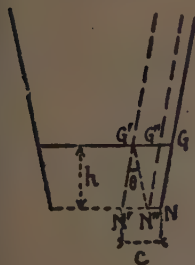


FIG. 34.

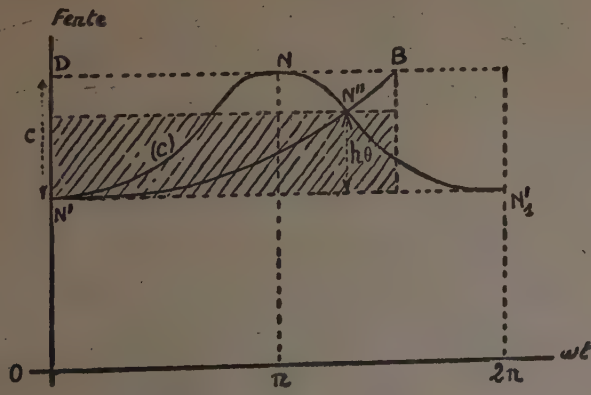


FIG. 35.

Si nous portons sur le même graphique la quantité  $h\theta$  à partir de la droite  $N'N'_1$  on obtient donc une parabole  $N'N''B$  de sommet  $N'$ .

Au point B, on a :

$$c = \frac{K}{2} \frac{g}{\omega^2} \theta (\text{DB})^2$$

$$\text{On en tire : } \text{DB} = \sqrt{\frac{2c}{K g \theta}} \omega$$

Connaissant  $\omega$ , il est donc facile de tracer cette parabole et d'obtenir la hauteur de chute  $h$ .

$$\text{Débit} = 60 n h (r + c') A \quad (c' = N'N'' \neq c)$$

$$= \frac{1800}{\pi} \omega h (r + c') A$$

Le débit étant proportionnel à  $\omega$  et à  $h$  est proportionnel au rectangle hachuré sur le graphique.

Exemple : MOUVEMENT SINUSOÏDAL DE LA MACHOIRE (fig. 36).

On voit qu'après la « vitesse maxima », le débit continue à croître un peu (de 15 %) et qu'il passe par un maximum. Ensuite il décroît lentement (c'est ce qu'on a appelé un palier de débit).

$$\text{Si } \omega \rightarrow \infty, h \rightarrow \frac{K}{2} \frac{g}{\omega^2} (2\pi)^2$$

$$\text{Le débit est alors équivalent à } \frac{1800}{\pi} \omega \frac{K}{2} \frac{g}{\omega^2} (2\pi)^2 (r + c') A$$

Il tend donc vers 0.

2° APPAREIL A BIELLE ET LEVIER

56. — L'articulation B décrit un petit arc de cercle  $B_1B_3$  de centre D (fig. 37). Aux points  $B_1$  et  $B_3$  correspondent respectivement les extrémités des diamètres  $B_1E_1$  et  $B_3E_3$ . (Dans ce cas particulier le rayon de l'excentrique ne peut pas être considéré comme un infiniment petit par rapport à la bielle BE.)

On voit que l'arc  $E_1E_2E_3$  est plus court que l'arc  $E_3E_4E_1$ , et ce d'autant plus que la bielle EB est plus courte et que l'angle  $\beta$  est plus grand. Le mouvement de B est donc plus rapide à l'aller qu'au retour.

Il en est de même pour le mouvement de la mâchoire. Le temps pendant lequel les matériaux peuvent descendre entre les mâchoires est donc augmenté, et par conséquent on peut faire tourner l'appareil plus vite. Il en résulte un débit supérieur.

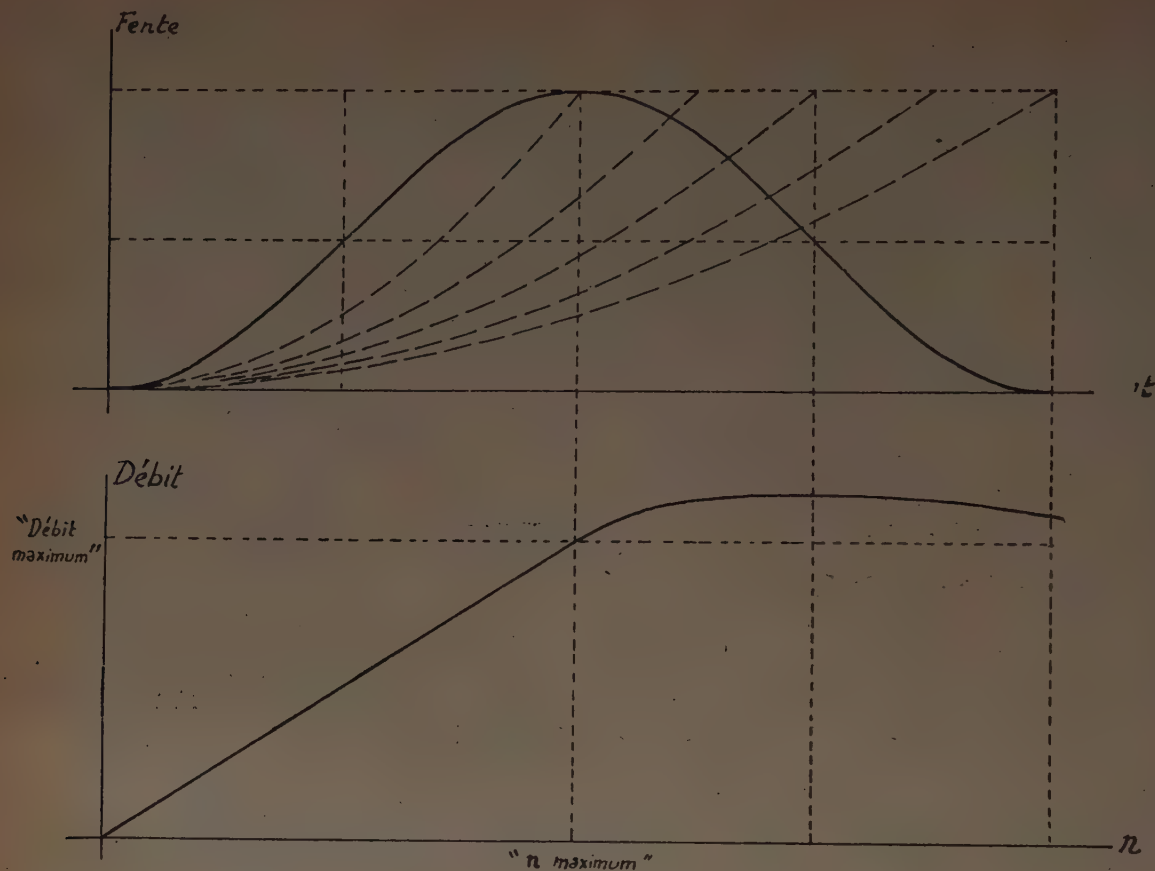


FIG. 36.

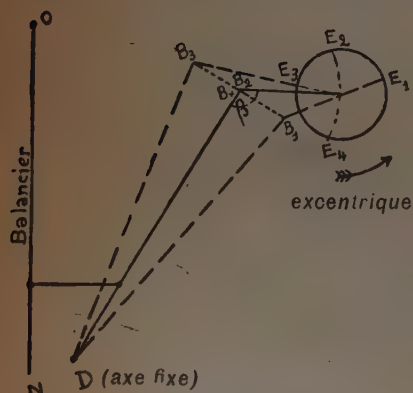


FIG. 37.

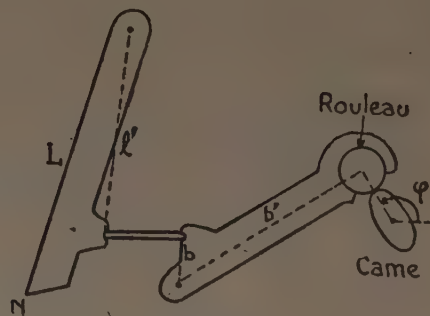


FIG. 38.



FIG. 39.

### 3° APPAREIL A CAME ET LEVIER

57. — Le balancier accomplit deux oscillations par tour, ce qui permet aux volants de tourner moins vite (fig. 38).

Le mouvement dépend de la forme de la came. Si l'on veut que le point N ait un mouvement de la forme  $f(t)$ , l'équation de la came en coordonnées polaires doit être :

$$\rho = \rho_0 + \frac{l'}{L} \times \frac{b'}{b} \times f\left(\frac{\varphi}{\omega}\right)$$

### 4° APPAREIL A MACHOIRES TANGENTES

58. — Dans les appareils précédents, l'écart des surfaces broyantes lors de la dernière compression des matériaux n'est pas uniforme.

Pour pallier cet inconvénient, un gravillonneur DRAGON a des mâchoires verticales sur une hauteur  $h$  (comprise entre  $1/5$  et  $1/4$  de la hauteur totale des mâchoires) (fig. 39).

Pour que tous les fragments soient comprimés au moins une fois sur cette hauteur  $h$  il faut que

$$h \geq \frac{K}{2} g \left( \frac{30}{n} \right)^2$$

( $K \neq 0,75$ )

### 5° TYPE DODGE

59. — Dimension de la bouche jusqu'à  $0,30 \times 0,40$  m.

L'axe de la mâchoire mobile étant près de la fente, la course de celle-ci est faible (fig. 40).

Un point P de la mâchoire mobile a un mouvement de la forme :

$$\frac{x}{l'} \varepsilon \cos \omega t$$

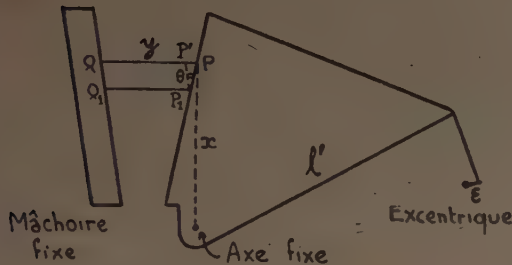


FIG. 40.

#### a) MACHOIRES DROITES.

$$PP' = \frac{2\varepsilon}{l'} x$$

$$PP_1 = \frac{2\varepsilon}{l'0} x$$

$$PQ \neq kx$$

$$S = (PQP_1Q_1) = \frac{2ek}{l'0} x^2$$

S décroît constamment de la bouche à la fente. La descente des matériaux est constamment freinée. Le débit est faible.

#### b) MACHOIRES A VOLUME CONSTANT.

$$PP_1 = \frac{2\varepsilon}{l'} x \frac{dx}{dy}$$

$$S = \frac{2\varepsilon}{l'} x \frac{dx}{dy} y = k$$

$$\frac{dy}{y} = \frac{2\varepsilon}{l'k} x dx$$

$$y = \lambda \alpha x^2$$

### 60. — 6° APPAREIL A CYLINDRE ET MACHOIRE (fig. 41) (pour mémoire.)

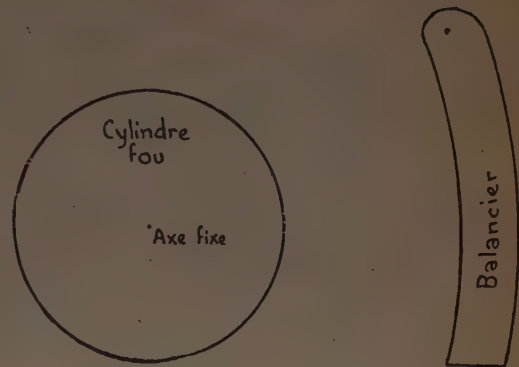


FIG. 41.

### B. — MACHOIRE MOBILE A EXCENTRIQUE

(type Simplex)

61. — Bouche. { Longueur : 0,15 à 0,40 m.  
Largeur : 0,25 à 1 m.

### 1° MOUVEMENT DE LA MACHOIRE MOBILE

Quand l'axe de la mâchoire décrit un cercle de rayon  $\varepsilon$ , l'articulation B décrit un arc de cercle qui peut être confondu avec sa corde  $\frac{2\varepsilon}{\sin \alpha}$  (fig. 42).

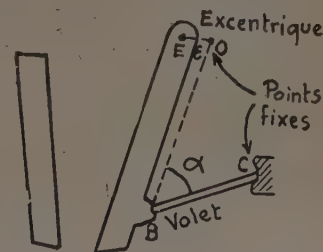


FIG. 42.

Soit P un point quelconque de la mâchoire mobile qui forme avec l'axe E (tournant autour de l'axe O de l'excentrique) et l'articulation B un triangle indéformable (fig. 43).

Le mouvement qui amènerait E de O en E<sub>1</sub> ou E<sub>2</sub> (B restant fixe) aurait pour centre instantané de rotation B.

Par conséquent, à  $E_1$  et  $E_3$  correspondent respectivement  $P_1$  et  $P_3$  tels que  $P_1P_3$  est perpendiculaire à  $BP$  et  $P_1P_3 = 2 \varepsilon \frac{BP}{BO}$ .

Le mouvement qui amènerait  $E$  de  $O$  en  $E_2$  ou  $E_4$  ( $B$  restant sur le segment  $B_2B_4$ ) aurait pour centre instantané de rotation  $I$ . Par conséquent, à  $E_2$  et  $E_4$  correspondent respectivement  $P_2$  et  $P_4$  tels que  $P_2P_4$  est perpendiculaire à  $IP$  et  $P_2P_4 = 2 \varepsilon \frac{IP}{IO}$ .

Quand l'axe  $E$  parcourt l'excentrique, le point  $P$  décrit une courbe  $P_1P_2P_3P_4$  et les centres instantanés de rotation de ce mouvement pour  $E_1E_2E_3E_4$  sont respectivement  $I, B_2, I, B_4$ . Par conséquent, les tangentes en  $P_1$  et  $P_3$  sont parallèles à  $P_2P_4$  et les tangentes en  $P_2$  et  $P_4$  sont parallèles à  $P_1P_3$ . Le lieu géométrique du point  $P$  est donc une ellipse.

Cette ellipse se réduit à un segment de droite pour le point  $C'$  de la mâchoire situé dans le prolongement du volet  $BC$ . Les points situés au-dessus de  $C'$  décrivent une ellipse dans le même sens que l'excentrique. Les points situés au-dessous de  $C'$  décrivent une ellipse dans le sens contraire; ils ont donc tendance à faire remonter les matériaux entre les mâchoires; pour que ce cas ne se présente pour aucun point de la mâchoire  $MN$ , il faut que l'articulation  $C$  soit située au-dessus de la ligne  $BN$ , ce qui correspond généralement à un angle  $\alpha < \frac{\pi}{2}$ .

Il est facile de mesurer la vitesse du point  $P$  à un instant donné. Sa vitesse moyenne est proportionnelle au périmètre de l'ellipse qu'il décrit.

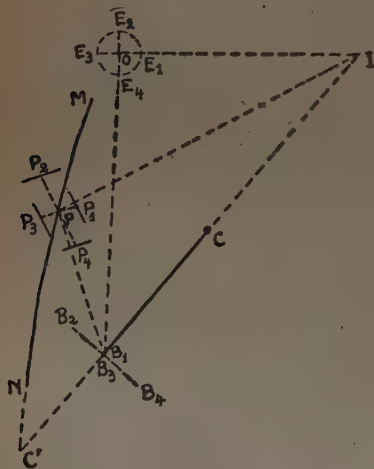


FIG. 43.

#### Variation de l'angle $\alpha$ .

Suivant les appareils il est compris entre 0 et  $\frac{\pi}{2}$  (c'est le cas le plus fréquent) ou entre  $\frac{\pi}{2}$  et  $\pi$ . Il peut aussi être voisin de  $\frac{\pi}{2}$ . Certains appareils comportent plusieurs

encoches  $B$  qui permettent de donner à l'angle  $\alpha$  différentes valeurs.

Si  $\alpha$  varie, le diamètre  $P_1P_3$  reste fixe.

Il est facile de tracer le diamètre  $P_2P_4$  suivant la position du volet  $BC$  (fig. 44).

Si  $\alpha < \frac{\pi}{2}$ , en augmentant  $\alpha$  on diminue le diamètre  $P_2P_4$ .

Si  $\alpha > \frac{\pi}{2}$ , en augmentant  $\alpha$  on augmente le diamètre  $P_2P_4$ .

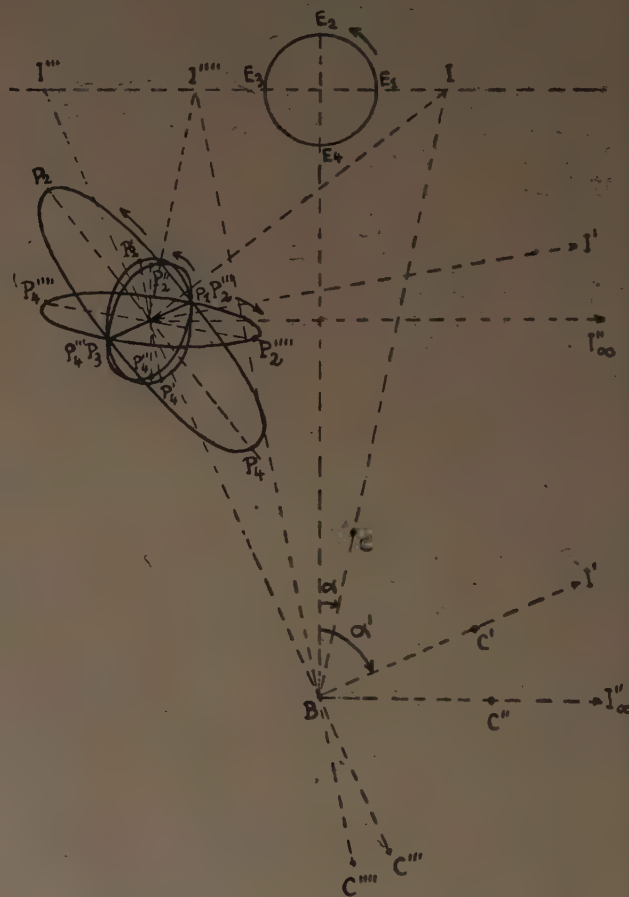


FIG. 44.

#### 2° DESCENTE DES MATÉRIAUX ENTRE LES MACHOIRES

61. — Si  $\alpha$  est assez voisin de  $\frac{\pi}{3}$  (comme c'est le cas le plus fréquent), on voit en traçant les lieux géométriques des différents points de la mâchoire mobile que l'enveloppe des diverses positions de cette mâchoire peut être assimilée sensiblement à deux plans parallèles (fig. 45).

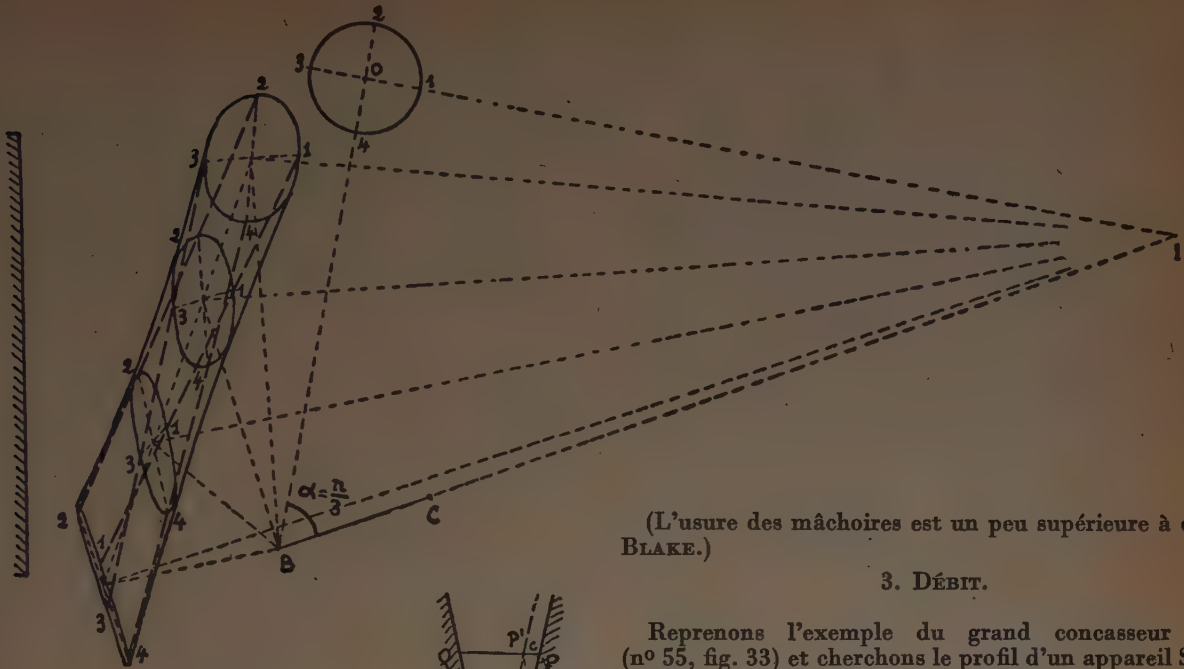


FIG. 45.

a) Mâchoires droites (fig. 46).

$$PP_1 = \frac{c}{\theta}$$

$$S = (PQP_1Q_1) = \frac{c}{\theta} x\theta = cx$$

La descente des matériaux est constamment freinée.

b) Mâchoires à volume constant.

### 1. PROFIL DES MÂCHOIRES.

Il faut que :

$$S = c \frac{dx}{dy} y = k \text{ (fig. 47)}$$

ou

$$\frac{dy}{y} = \frac{c}{k} \frac{dx}{x}$$

$$y = \lambda a^x$$

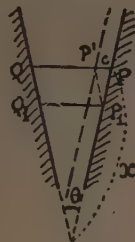


FIG. 46.

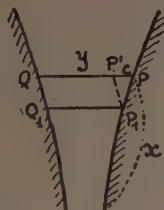


FIG. 47.

### 2. VITESSE DE DESCENTE DES MATÉRIAUX.

Le mouvement elliptique de la mâchoire facilite la descente des matériaux. Cet effet est d'autant plus accentué que la courbure de l'ellipse est plus faible au point où les mâchoires sont le plus rapprochées. Mais il suffit de tracer ces ellipses pour se rendre compte que c'est à la fente qu'elles sont le plus aplaties (pour  $\alpha < \frac{\pi}{2}$ ) alors que c'est précisément là qu'elles devraient l'être moins (fig. 45). Aussi les appareils Simplex ne peuvent-ils tourner qu'à une vitesse légèrement supérieure à celle des appareils BLAKE de même angle de prise à la fente et de même course.

(L'usure des mâchoires est un peu supérieure à celle du BLAKE.)

### 3. DÉBIT.

Reprenons l'exemple du grand concasseur BLAKE (n° 55, fig. 33) et cherchons le profil d'un appareil Simplex (fictif) à volume constant de même bouche, de même réglage, et de même course :  $y = \lambda a^x$

A la bouche.....	$1,5 = \lambda a^{3,7}$
A la fente.....	$0,2 = \lambda a^{0,5}$

$$\text{D'où} \dots\dots\dots 7,5 = a^{3,2}$$

A la fente,

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{dy}{dx} = \lambda a^x \log_e a = y \log_e a = 0,126$$

D'où  $\theta = 7^\circ$ .

Or, nous avons vu que le débit maximum est inversement proportionnel à  $\sqrt{\theta}$  (n° 55). Le rapport du débit maximum du concasseur Simplex à celui de BLAKE est

$$\text{donc } \sqrt{\frac{11,5}{7}} = 1,27.$$

On pouvait prévoir que le débit du Simplex serait supérieur, puisque le travail de la mâchoire mobile est beaucoup plus grand à son embouchure qu'à celle du Blake. Mais l'angle de prise  $y$  est plus grand (on trouve  $45^\circ$  pour ce Simplex fictif). Il faut donc diminuer la « longueur » de la bouche, augmenter le réglage, ou augmenter la hauteur des mâchoires. Par contre, nous avons vu (n° 54) qu'il n'est pas nécessaire d'élever l'axe du balancier des appareils à volume constant.

### 3° GRAVILLONNEUR « EJECTO »

63. — La mâchoire qui porte l'excentrique est actionnée comme celle du Simplex. Elle a donc le même mouvement (fig. 48).

Mais l'autre mâchoire, grâce au système de bielles  $b_1 b_2 b_3$ , se déplace verticalement en même temps que la mâchoire dite mobile. Il en résulte que le mouvement

relatif d'un point de la mâchoire mobile par rapport à l'autre mâchoire se réduit sensiblement à un segment horizontal.

Si  $\alpha$  est voisin de  $\frac{\pi}{3}$  le mouvement relatif de la mâchoire mobile est en première approximation un mouvement de translation horizontal.

Le seul avantage de cet appareil sur le Simplex est la moindre usure des mâchoires. Par contre les bielles entraînent des complications mécaniques.

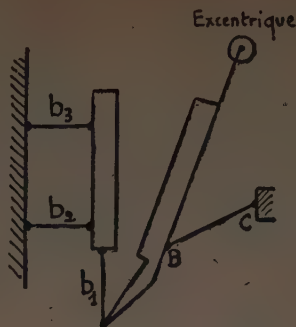


FIG. 48.

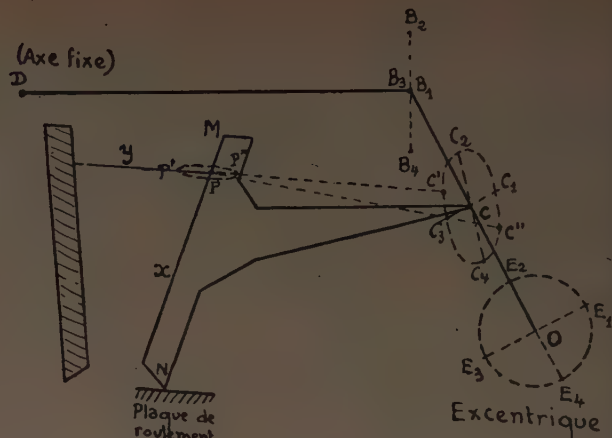


FIG. 49.

### C. — APPAREIL A MOUVEMENT RÉCIPROQUE

64. — BD et BO sont deux bielles (fig. 49).

Le triangle MNC est rigide.

Quand l'excentrique E décrit le cercle  $E_1E_2E_3E_4$ , B décrit un segment  $B_1B_2B_3B_4$ . L'articulation C décrit donc une ellipse  $C_1C_2C_3C_4$  (même raisonnement que pour le Simplex n° 61).

De même puisque le rouleau N décrit un segment de droite, un point quelconque P de la mâchoire décrit une ellipse aplatie.

Si  $PC'$  et  $PC''$  sont les normales à l'ellipse C aux points  $C'$  et  $C''$  correspondent respectivement les points  $P'$  et  $P''$  qui sont voisins des extrémités du grand axe de l'ellipse P. On voit ainsi dans le cas de figure que la course du point M est un peu plus grande que celle du point N. En première approximation le mouvement de la mâchoire mobile est donc la somme d'un mouvement de translation horizontal et d'un faible mouvement de type DODGE.

La descente des matériaux entre les mâchoires se fait à peu près comme dans le Simplex.

Mâchoires à volume constant :  $\gamma = \lambda \alpha^2$ .

Débit : à peu près le même que celui du Simplex.

## III. — APPAREILS GIRATOIRES

### A. — CARACTÉRISTIQUES

65. — Diamètre d'entrée : 0,25 à 5 m :

Ouverture nominale (distance entre le boisseau et la noix à l'entrée) : 0,05 à 1,50 m

La fragmentation s'opère :

Le long de chaque génératrice, d'une façon analogue à celle d'un BLAKE (fig. 50),

Et dans une section horizontale, d'une façon analogue à celle d'un appareil à cylindre et mâchoire concave (n° 60).

Mais l'effort de la machine est continu et n'exige pas de volants.

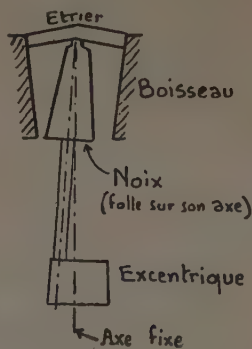


FIG. 50.

### B. — MOUVEMENT DE LA NOIX

66. — Considérons une section horizontale. Elle coupe le boisseau et la noix suivant deux cercles  $C_1$  et  $C_2$  (fig. 51).

L'axe E de la noix décrivant le cercle de centre O et de rayon  $\varepsilon$  d'un mouvement uniforme de vitesse angulaire  $\omega$  l'espace libre  $P_1P_2$  pris sur un rayon quelconque  $OP_1$  varie comme l'espace  $A_1A_2$  correspondant à un rayon  $OA_1$  qui serait animé d'un mouvement uniforme de vitesse angulaire  $\omega$  (les cercles  $C_1$  et  $C_2$  restant fixes).

Or

$$A_1A_2 = R_1 - R_2 + \varepsilon \cos \omega t.$$

Le mouvement de compression est donc sinusoïdal.

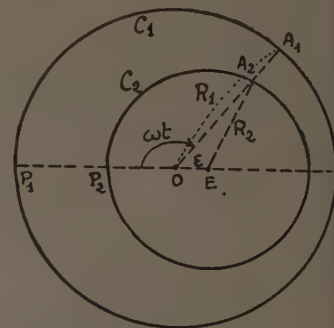


FIG. 51.

## C. — DESCENTE DES MATÉRIAUX

## 1° BOISSEAU ET NOIX CONIQUES

(d'angles au sommet faibles).

67. — L' « anneau »  $PQP_1Q_1$  est comprimé en  $P'QP_1'Q_1$ , puis il descend au plus en  $P_1Q_1P_2Q_2$  en reprenant à peu près son volume apparent initial, et ainsi de suite (fig. 52).

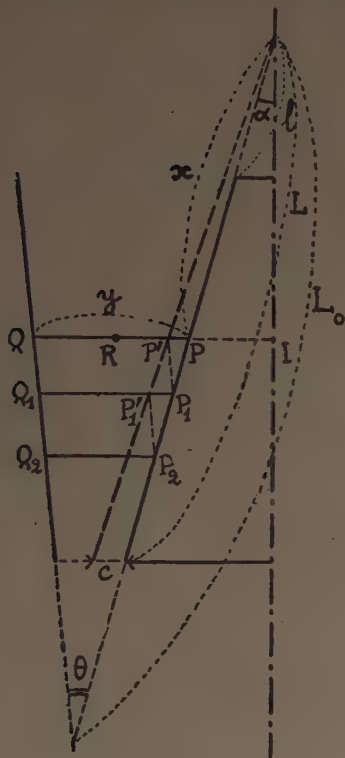


FIG. 52.

$$PP_1 = \frac{cx}{L_0}$$

$$PQ = y = \theta(L_0 - x)$$

Le rayon moyen de l'anneau  $PQP_1Q_1$  est

$$IR = IP + \frac{PQ}{2} = \alpha x + \frac{\theta(L_0 - x)}{2}$$

Son volume est

$$\begin{aligned} V &= \frac{cx}{L_0} \theta(L_0 - x) 2\pi \left[ \alpha x + \frac{\theta(L_0 - x)}{2} \right] \\ &= \frac{2\pi c}{L} \left[ x^3 \left( \frac{\theta}{2} - \alpha \right) + x^2 L_0 (\alpha - \theta) + x \frac{\theta L_0^2}{2} \right] \end{aligned}$$

$$\frac{dV}{dx} = \frac{2\pi c}{L} \left[ 3 \left( \frac{\theta}{2} - \alpha \right) x^2 + 2L_0 (\alpha - \theta) x + \frac{\theta L_0^2}{2} \right]$$

Il est facile de voir algébriquement qu'une seule racine de ce trinôme est comprise entre 0 et  $L_0$  :

$$x = \frac{L_0 \left( \theta - \alpha - \sqrt{\alpha^2 - \frac{\alpha\theta}{2} + \frac{\theta^2}{4}} \right)}{3 \left( \frac{\theta}{2} - \alpha \right)}$$

La descente des matériaux est donc analogue à celle de l'appareil BLAKE à mâchoires droites (n° 54). Près de la bouche, les gros fragments forment voûte. Près de la fente, la descente est freinée par les couches inférieures : il y a donc surbroyage, le débit est réduit, et l'usure des surfaces broyantes est plus accentuée.

Exemples.

a)

$$\theta = 2\alpha$$

$$\frac{dV}{dx} = -4\pi \frac{c}{L} \alpha L \left( x - \frac{L_0}{2} \right)$$

$x$	1	$\frac{L_0}{2}$	$L$
$V$		↗ maximum ↘	

[On trouve la même racine  $\frac{L_0}{2}$  que pour le BLAKE (n° 54).

En effet, le giratoire peut être alors considéré comme un BLAKE à fente circulaire.]

b)

$$\theta = \alpha \text{ (boisseau cylindrique)}$$

$$x = \frac{L_0}{\sqrt{3}} = 0,58L_0$$

$x$	1	$\frac{L_0}{\sqrt{3}}$	$L$
$V$		↗ maximum ↘	

## Vitesse de descente des matériaux.

Les matériaux ne peuvent descendre que pendant  $1/2$  tour d'excentrique, c'est-à-dire pendant  $\frac{30}{n}$  s.

En chute libre ils parcouraient  $\frac{1}{2} g \frac{900}{n^2}$ .

En réalité les frottements réduisent leur chute à

$$K \frac{450g}{n^2} \text{ (avec } K \neq 0,75)$$

Pour qu'ils aient le temps de parcourir la distance  $PP_1$ , il faut que :

$$K \frac{450g}{n^2} > \frac{cx}{L_0}$$

En particulier, au point où  $PP_1$  est maximum, c'est-à-dire à la fente

$$n^2 < K \frac{450g\theta}{\pi}$$

$$\text{Vitesse maxima : } n = \sqrt{K \frac{450g\theta}{c}}$$

Débit : Si R est le rayon moyen de la fente, le volume (apparent) d'un anneau tel que PQP<sub>1</sub>Q<sub>1</sub> à la fente est

$$V = \frac{c}{\theta} (r + c) 2\pi R$$

$$\text{Débit en 1 h : } 60n \frac{c}{\theta} (r + c) 2\pi R.$$

$$\text{Or la « vitesse maxima » est } n = \sqrt{\frac{K450g\theta}{c}}$$

D'où le débit maximum :

$$P = \sqrt{1620000 K \times g \frac{c}{\theta} (r + c) 2\pi R}$$

On voit [comme pour le BLAKE (n° 55)] que ce débit maximum est sensiblement proportionnel à la fente moyenne ( $r \times 2 \pi R$ ) et à  $\sqrt{c}$ , et inversement proportionnel à  $\sqrt{\theta}$ .

Si l'on dépasse la « vitesse maxima », les matériaux sont repris par les surfaces broyantes avant d'avoir pu descendre complètement. Cependant le débit croît encore de 15 %, puis il décroît lentement. (Voir le débit du BLAKE pour un mouvement sinusoïdal de la mâchoire, au n° 55, fig. 36.)

Exemple : Grand giratoire.

$$c = 0,05 \text{ m}$$

$$r = 0,20$$

$$R = 2 \text{ m}$$

$$\theta = 22^\circ$$

Densité apparente des matériaux : 1,2

On trouve  $P = 4700 \text{ t/h}$ .

## 2° GIRATOIRE A VOLUME CONSTANT

$$68. \quad PP' = \frac{c}{L} x \text{ (fig. 53)}$$

$$PP_1 = -\frac{c}{L} x \frac{dx}{dy}$$

En première approximation les rayons de giration des anneaux engendrés par les sections PQP<sub>1</sub>Q<sub>1</sub> sont de la forme  $m'x + m''$  ( $m' \neq 0$ ).

Volume de l'anneau :

$$V = -\frac{c}{L} x \frac{dx}{dy} y 2\pi (m'x + m'') = C^te$$

$$\frac{dy}{y} = -k \left( x + \frac{m'}{m''} x^2 \right) dx$$

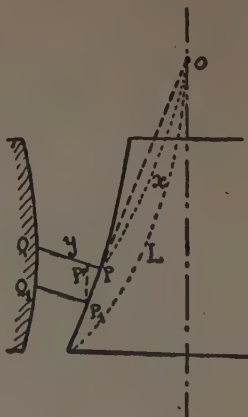


FIG. 53.

D'où

$$y = \lambda a^{-x^2} - \frac{2m'}{3m''} x^3$$

Les constantes  $\lambda$  et  $a$  sont déterminées quand on fixe l'ouverture nominale et le réglage.

$$\text{Cas particulier : } m'x + m'' \equiv R = \text{constante}$$

$$y = \lambda a^{-x^2}$$

(comme pour le BLAKE).

Débit maximum : Comme pour le BLAKE, on trouve qu'il est augmenté de 38 % par rapport à celui du giratoire à boisseau et noix coniques.

## 3° GIRATOIRE A SECTION CONSTANTE

69. — [Il s'agit de la section d'écoulement des matériaux. Nous verrons que c'est le tronc de cône de génératrice P'Q (fig. 54).]

L'aire de la section d'écoulement des matériaux est

$$y \times 2\pi \left( x \sin \alpha + \frac{y}{2} \cos \alpha \right) = C^te$$

ou

$$y^2 + 2yx \operatorname{tg} \alpha - k = 0$$

C'est l'équation d'une hyperbole d'axes :

$$y = 0$$

$$y = -2x \operatorname{tg} \alpha$$

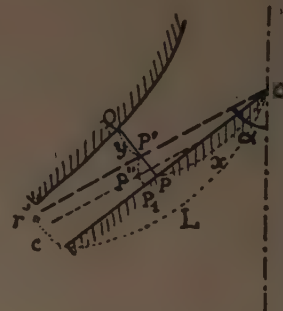


FIG. 54.

Elle est déterminée si l'on donne le réglage  $r$ .

La course est considérable (six à sept fois le réglage). Nous allons voir qu'il peut en être ainsi parce que les matériaux ne remplissent pas tout l'intervalle compris entre le boisseau et la noix.

### a) Gravillonneur Gyracône.

Il peut avoir jusqu'à 1,50 m de diamètre à la fente. L'angle au sommet de la noix est voisin de  $100^\circ$ .

L'appareil tourne à grande vitesse (jusqu'à 1000 tours-minute). Comme la course est grande les matériaux ne sont comprimés réellement que pendant une petite fraction de tour. Ils parcourent donc en chute libre :

$$P'P'' \neq \frac{1}{2} g \left( \frac{60}{n} \right)^2$$

Par exemple, pour  $n = 700$ ,  $P'P'' = 0,036 \text{ m}$ .

La hauteur de chute est donc du même ordre que le réglage. Il en résulte que tous les points  $P''$  sont sensiblement sur une droite parallèle à  $OP'$ .

Les matériaux s'écoulent donc à une vitesse moyenne sensiblement constante :

$$\frac{PP_1}{\frac{60}{n}} = \frac{P'P'' \cos \alpha}{\frac{60}{n}} = \frac{30 \times 9,81 \cos \alpha}{n} \text{ (m/s)}$$

Alors que le débit des giratoires ordinaires, utilisés au-dessous de la *vitesse maxima* est proportionnel à la vitesse, nous voyons que le débit du gyracône est inversement proportionnel à cette vitesse.

Exemple :  $R = 0,5 \text{ m}$ ;  
 $r = 0,03$ ;  
 $n = 700$ ;  
 $\alpha = 50^\circ$ ;  
 densité apparente des matériaux : 1,2.

On trouve comme débit :  $P = 110 \text{ t/h}$

#### b) Gyrasphère.

Si c'est le boisseau qui est conique, la génératrice de la noix est une hyperbole dont la concavité est tournée vers le bas. On peut l'assimiler à un cercle qui engendre une noix sphérique (fig. 55).



FIG. 55.

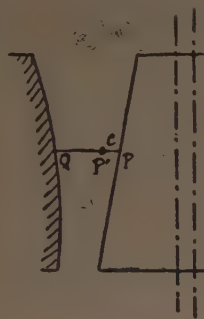


FIG. 56.

#### 4° APPAREIL A NOIX EXCENTRIQUE

70. — Le long de chaque génératrice, tout se passe à peu près comme dans un appareil à mâchoires *Ejecto* (n° 63) (fig. 56).

#### 5° APPAREIL A ROULEAU EXCENTRIQUE

71. — Le rouleau fonctionne comme une noix cylindrique d'axe horizontal (fig. 57). Mais la fragmentation est plutôt analogue à celle d'un Simplex.

Par suite de l'inertie du rouleau et des frottements tout autour, un point P quelconque décrit sensiblement une ellipse. On peut prendre sa course égale à  $2\epsilon$ .

Appareil à volume constant.

$$2\epsilon \frac{dx}{dy} y = k$$

$$y = \lambda a^x \text{ (comme pour le Simplex).}$$



FIG. 57.

#### 6° APPAREIL A DISQUES

##### 72. — Caractéristiques (fig. 58).

Diamètre des disques : jusqu'à 1,20 m;  
 Vitesse de rotation de l'excentrique :  $n'$ ;  
 Vitesse de rotation des disques :  $n'' =$  jusqu'à 250.

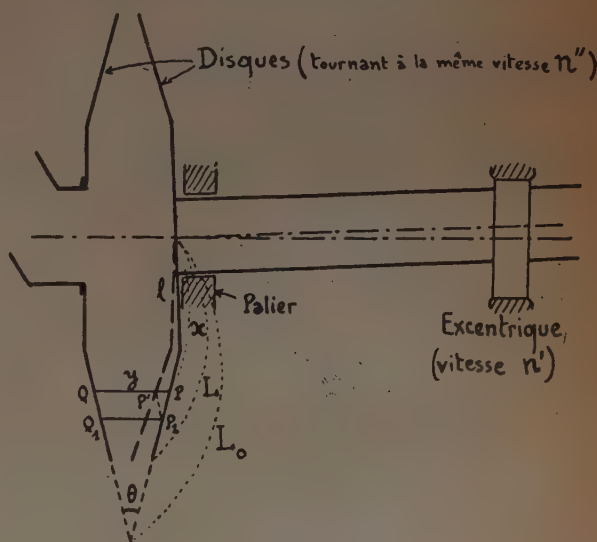


FIG. 58.

Un fragment situé à une distance  $x$  de l'axe est entraîné vers le pourtour des disques avec une accélération centrifuge :

$$\gamma = \omega^2 x = \left( \frac{\pi n''}{30} \right)^2 x$$

EXEMPLE :  $n'' = 200$   
 $x = 0,50 \text{ m} \quad \gamma = 220 \text{ m/s}^2$

L'accélération de la pesanteur est donc négligeable vis-à-vis de cette accélération centrifuge.

L'appareil fonctionne donc comme un giratoire dont l'axe est horizontal, dont la vitesse de rotation (relative) de l'excentrique est  $n = n' - n''$ , dont l'angle au sommet

de la noix est voisin de  $\pi$ , et où la pesanteur est remplacée par une force centrifuge.

a) Disques coniques.

$$PP' = \frac{cx}{L}$$

$$PP_1 = \frac{cx}{L\theta}$$

$$PQ = y = \theta(L_0 - x)$$

Volume de l'anneau  $PQP_1Q_1$  :

$$V = \frac{cx}{L\theta} \theta(L_0 - x) 2\pi x$$

$$= mx^2(L_0 - x)$$

$$\frac{dV}{dx} = mx(2L_0 - 3x)$$

$x$	0	$l$	$\frac{2L_0}{3}$	$L$	$L_0$
$V$			↗ maximum ↘		

Les matériaux sont donc freinés à la fente.

b) Disques à volume constant.

$$PP_1 = -\frac{cx}{L} \frac{dx}{dy}$$

$$V = -\frac{cx}{L} \frac{dx}{dy} y 2\pi x = \text{constante}$$

$$\frac{dy}{y} = -kx^2 dx$$

$$y = \lambda a^{-x^3}$$

Les constantes  $\lambda$  et  $a$  sont déterminées quand on fixe le réglage et l'angle de prise de la fente.

Vitesse radiale des matériaux.

Les matériaux peuvent se déplacer de  $PQ$  à  $P_1Q_1$  pendant  $1/2$  tour d'excentrique, c'est-à-dire pendant  $\frac{30}{n}$  s.

S'ils n'étaient soumis qu'à l'accélération  $\gamma$  ils parcouraient :

$$\frac{1}{2} \gamma \frac{900}{n^2}$$

En réalité les frottements réduisent le parcours à  $K \frac{450}{n^2} \gamma$  ( $K \neq 0,75$ ).

Pour qu'ils aient le temps de parcourir l'espace  $PP_1$ , il faut que

$$K \frac{450\gamma}{n^2} > \frac{cx}{L\theta}$$

En particulier, au point où  $PP_1$  est maximum, c'est-à-dire à la fente,

$$n^2 < K \frac{450\gamma\theta}{c}$$

$$\text{Vitesse maxima : } n = \sqrt{K \frac{450\gamma\theta}{c}}$$

Exemple :  $\gamma = 220 \text{ m/s}^2$  (Suite de l'exemple précédent).

$$\theta = 20^\circ;$$

$$c = 0,005.$$

On trouve :  $n = 2350$ .

Si l'excentrique tourne dans le sens contraire des disques,  $n' = 2350 - 200 = 2150$ .

Débit : Si  $R$  est le rayon de la fente, le volume (apparent) d'un anneau  $PQP_1Q_1$  à la fente est :

$$V = \frac{c}{\theta} (r + c) 2\pi R$$

$$\text{Débit en 1 h : } 60n \frac{c}{\theta} (r + c) 2\pi R$$

$$\text{Or la vitesse maxima est } n = \sqrt{K \frac{450\gamma\theta}{c}}$$

D'où le débit maximum :

$$P = \sqrt{1\,620\,000 K \gamma \frac{c}{\theta}} (r + c) 2\pi R$$

Exemple :  $\gamma = 220 \text{ m/s}^2$ ;

$$c = 0,005;$$

$$r = 0,02;$$

$$\theta = 20^\circ;$$

$$R = 0,5;$$

$$\text{Densité apparente des matériaux} = 1,2.$$

On trouve :  $P = 185 \text{ t/h}$ .

Si l'on dépasse la « vitesse maxima », le débit croît encore de 15%, puis il décroît lentement. (Voir le débit du BLAKE pour un mouvement sinusoïdal de la mâchoire : n° 55, fig. 36.)

#### IV. — APPAREILS A CYLINDRES

##### 73. — CARACTÉRISTIQUES

Diamètre :  $D = 0,40$  à  $2 \text{ m}$ .

Largeur :  $L = 0,25$  à  $1,80 \text{ m}$ .

Vitesse tangentielle :  $V =$  jusqu'à  $10 \text{ m/s}$ .

Formule empirique de DUPRAT :  $n = 35,4D + \frac{65}{D} - 68,3$

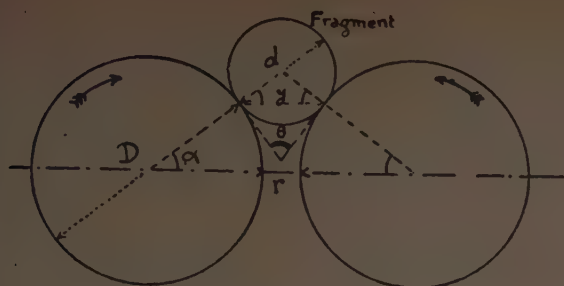


FIG. 59.

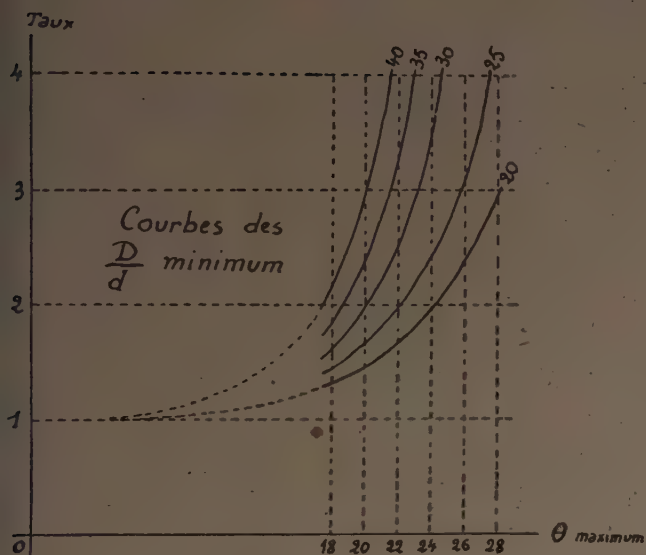


FIG. 60.

Nous avons vu que l'angle de prise  $\theta$  doit être inférieur à  $2\varphi$  (n° 48), ou

$$\cos \alpha > \cos \varphi \text{ (fig. 59)}$$

$$\frac{D+r}{D+d} > \cos \varphi$$

$$D > \frac{d \cos \varphi - r}{1 - \cos \varphi}$$

Si  $t$  est le taux de réduction  $\neq \frac{d}{r}$

$$\frac{D}{d} > \frac{\cos \varphi - \frac{1}{t}}{1 - \cos \varphi} \neq \frac{1 - \frac{1}{t}}{1 - \cos \varphi}$$

Grâce à cette formule, on peut tracer les courbes des  $\frac{D}{d}$  minimum (fig. 60).

#### Vitesse d'écrasement.

$$\alpha = \omega t + 2K\pi$$

$$y = D(1 - \cos \omega t) + r$$

$$\frac{dy}{dt} = D\omega \sin \omega t \text{ (fig. 61)}$$

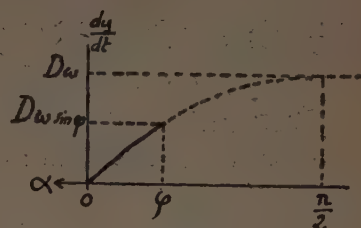


FIG. 61.

#### Taux de réduction.

Le volume absolu des matériaux en vrac est compris entre 40 et 60 % du volume apparent (selon qu'ils sont concassés ou roulés). Si l'appareil est alimenté à plein, le taux ne peut donc pas dépasser  $\frac{1}{0,6}$  à  $\frac{1}{0,4}$ , soit : 1,7 à 2,5.

Pour obtenir un taux supérieur, il est nécessaire de régler l'alimentation en fonction de la vitesse de façon que le volume absolu des matériaux soit une fraction  $K$  du ruban théorique  $V \times L \times r$ .

Pratiquement, on prend  $K = 0,2$  à  $0,3$ .

Débit :

Exemple :  $L = 0,80$  m;

$r = 0,002$ ;

$V = 5$  m/s;

$K = 0,2$ ;

Poids spécifique des matériaux = 2,7.

$$P = 5 \times 0,8 \times 0,002 \times 0,2 \times 2,7 \times 3600 = 15 \text{ t/h.}$$

## V. — APPAREILS A BOULETS

### A. — TECHNOLOGIE

#### 74. — 1° Ball mill.

Diamètre : jusqu'à 3 m.

Largeur : jusqu'à 1,50 m.

La marche est continue ou discontinue.

Les boulets écrasent la matière en tombant d'une aube à l'autre (fig. 62).

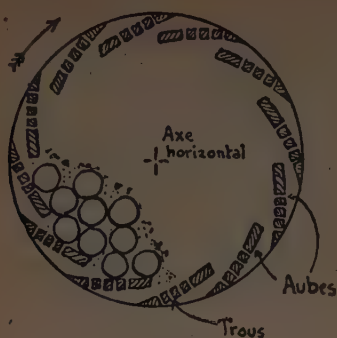


FIG. 62.

### 2° Tube mill (ou « Cylindre Alsing »).

Diamètre : jusqu'à 2,35 m.

Longueur : jusqu'à 10 m.

(Les tubes mills courts ont une longueur à peu près égale au diamètre.)

La marche est généralement continue : les matières fines se comportent comme un liquide visqueux ; elles entrent par une extrémité et sortent par l'autre (on augmente la vitesse d'écoulement en inclinant légèrement l'axe).

La paroi intérieure du cylindre est lisse ou ondulée.

### 3° Corps broyants.

a) Boulets d'acier ;

b) Barres (ou tiges), bâtonnets cylindriques (cylpebs) ;

c) Galets de silex, galets artificiels.

Diamètre optimum : On sait que l'angle de prise  $\theta$  doit être inférieur à  $2\varphi$  (n° 48).

$$\frac{\Delta}{\Delta + \delta} > \cos \varphi \text{ (fig. 63).}$$

D'où

$$\frac{\Delta}{\delta} > \frac{\cos \varphi}{1 - \cos \varphi}$$

Exemple :  $\delta = 0,004 \text{ m}$  ;

$\varphi = 13^\circ$  (roche friable).

On trouve :  $\Delta > 0,15 \text{ m}$ .

(Cette formule n'est valable que pour le broyage dû au roulement des boulets les uns sur les autres (ball mill). Nous verrons que dans le tube mill le broyage s'effectue surtout par la chute des boulets sur la matière à fragmenter.)

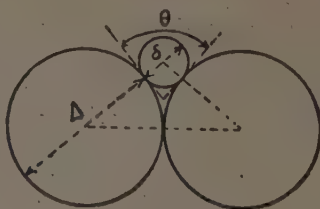


FIG. 63.

## B. — MOUVEMENT D'UN BOULET OU D'UNE PARTICULE

75. — Soit  $R$  le rayon du cylindre d'un tube mill et  $n$  sa vitesse de rotation  $= \frac{30\omega}{\pi}$ .

Nous supposons que le mouvement a lieu dans un plan perpendiculaire à l'axe et qu'il n'y a pas de glissement des boulets périphériques sur la paroi du cylindre.

Une particule quelconque  $P$  de la charge décrit un arc de cercle avec une vitesse

$$(1) \quad V = r\omega$$

Elle quitte ce cercle quand la projection de son poids sur le rayon  $OP$  a la même valeur absolue que la force centrifuge. Soit  $\alpha$  l'angle  $\widehat{POy}$  correspondant (fig. 64).

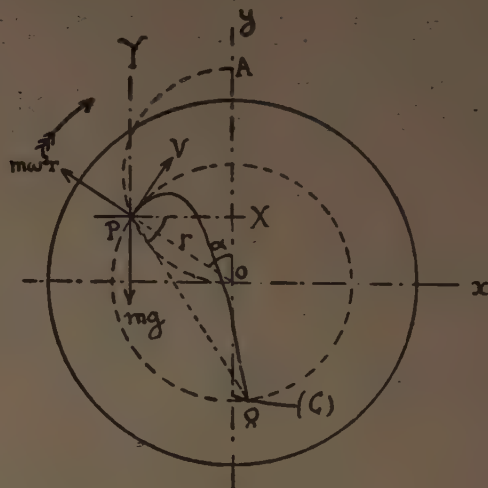


FIG. 64.

$$(2) \quad g \cos \alpha = \omega^2 r$$

ou

$$(3) \quad \cos \alpha = \frac{r}{d}$$

si l'on pose

$$(4) \quad \left\{ \begin{aligned} d &= \frac{g}{\omega^2} = \frac{g}{\left(\frac{\pi n}{30}\right)^2} \\ \text{ou} \\ d &= \frac{893}{n^2} \end{aligned} \right.$$

La particule décrit ensuite une parabole :

$$(5) \quad Y = X \operatorname{tg} \alpha - \frac{X^2}{2r \cos^3 \alpha}$$

(si l'on fait abstraction de la résistance de l'air).

Lieu des origines des paraboles : D'après (3)

$$r = d \cos \alpha$$

C'est l'équation polaire d'un cercle centré sur Oy, de diamètre :  $OA = d$ .

Vitesse critique.

Les particules sont centrifugées si  $r \geq d$  ou, d'après (4),  $r \geq \frac{893}{n^2}$ .

Vitesse critique :

$$(6) \quad n = \frac{30}{\sqrt{r}}$$

Point de chute.

La particule P reprend le cercle qu'elle a quitté, en Q.

$$\text{Parabole : } Y = X \tan \alpha - \frac{X^2}{2r \cos^2 \alpha}$$

$$\text{Cercle : } X^2 + Y^2 - 2rX \sin \alpha + 2rY \cos \alpha = 0$$

La résolution de ces deux équations conduit à la solution :

$$(7) \quad \begin{aligned} X_Q &= 4r \sin \alpha \cos^2 \alpha \\ Y_Q &= -4r \sin^2 \alpha \cos \alpha \end{aligned}$$

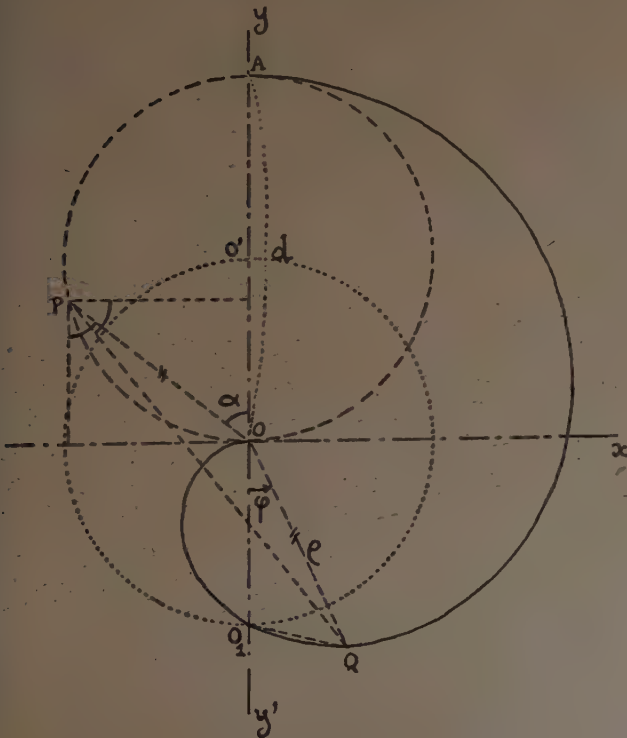


FIG. 65.

Quand l'angle  $\alpha$  varie, le point Q décrit une courbe (C). On voit que :

$$\tan(PX, PQ) = \frac{Y_Q}{X_Q} = -\tan \alpha$$

Il est donc facile de construire cette courbe.

Identification de la courbe (C).

$$\begin{aligned} (Oy', OQ) &= (Oy', OP) + (OP, OQ) \text{ (fig. 65)} \\ &= (-\pi + \alpha) + (2\pi - 4\alpha) \\ &= \pi - 3\alpha \text{ [donc } (OQ, Oy) = 3\alpha] \end{aligned}$$

Posons :

$$\begin{aligned} OQ &= \rho = d \cos \alpha \text{ [d'après (3)]} \\ (Oy', OQ) &= \varphi = \pi - 3\alpha \end{aligned}$$

L'équation de (C) en coordonnées polaires devient

$$\rho = d \cos \frac{\pi - \varphi}{3}$$

C'est l'équation polaire d'un *limaçon de Pascal* : conchoïde du cercle de centre O et de diamètre  $O_1O' = d$ .

On peut le voir géométriquement :

En effet,  $(O'y, O'P) = 2\alpha$  (fig. 66).

Si PSW est perpendiculaire à  $0\alpha$ , on a :

$$(OP, OS) = (O'P, O'S) = \pi - 3\alpha$$

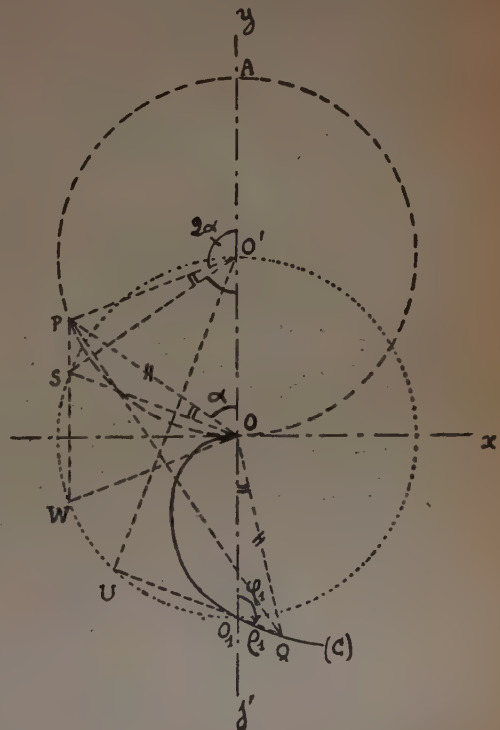


FIG. 66.

Donc :  $(OP, OS) = (Oy', OQ)$

Les deux figures OPSW et OQO<sub>1</sub>U sont donc égales.

D'où :  $UQ = WP = \frac{d}{2}$ .

L'équation de la courbe (C) en coordonnées polaires (de pôle O<sub>1</sub> et d'axe O<sub>1</sub>Y) est donc :

$$\rho_1 = \overline{O_1Q} = \overline{O_1U} + \overline{UQ} = d \cos \varphi_1 + \frac{d}{2}$$

C'est bien un limaçon de PASCAL du cercle de diamètre O<sub>1</sub>O' = d.

### C. — EFFICACITÉ DU BROUAGE PAR CHUTE LIBRE

#### 1<sup>o</sup> VITESSE DE CHUTE

76. — Soit  $v$  la vitesse du boulet qui arrive au point Q (fig. 67).

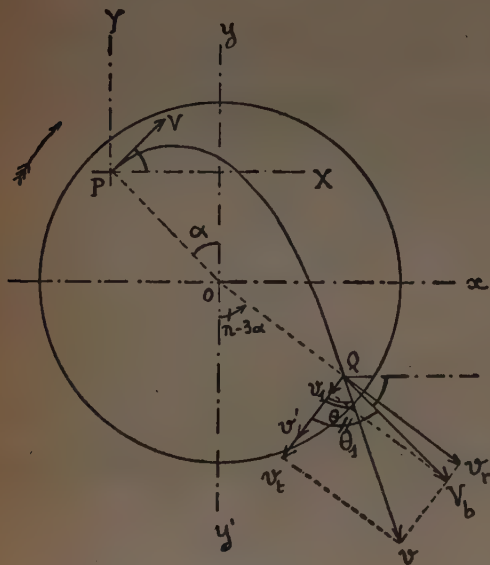


FIG. 67.

Et soit  $v'$  la vitesse au point Q de la matière qui tourne avec le cylindre.

Cherchons la vitesse de chute relative  $V_b$  du boulet sur la matière. Elle a pour composantes  $v_r$  et  $v_t$  —  $v'$ . L'efficacité du broyage en Q augmentera avec  $V_b$ .

$$v' = V = r\omega = \sqrt{rg \cos \alpha} \text{ [d'après (1) et (2)].}$$

$$\text{Temps de parcours de la parabole : } t = \frac{X_0}{V \cos \alpha}$$

D'où

$$v = \sqrt{V^2 \cos^2 \alpha + \left( V \sin \alpha - \frac{gX_0}{V \cos \alpha} \right)^2}$$

En remplaçant  $X_0$  par sa valeur  $4r \sin \alpha \cos^2 \alpha$  [d'après

(7)], il vient :

$$v = \sqrt{9rg \cos \alpha - 8rg \cos^3 \alpha}$$

D'où

$$V_b^2 = v^2 - 2vv' \cos \theta + v'^2 \\ = rg \cos \alpha (10 - 8 \cos^2 \alpha - 2 \sqrt{1 + 8 \sin^2 \alpha \cos \theta})$$

Calculons  $\cos \theta$  :

$$\text{Tangente au cercle } \left( \frac{dY}{dX} \right)_1 = \operatorname{tg}(\pi - 3\alpha) = \frac{4 \sin^3 \alpha - 3 \sin \alpha}{4 \cos^3 \alpha - 3 \cos \alpha}$$

$$\text{Tangente à la parabole } \left( \frac{dY}{dX} \right)_2 = \operatorname{tg} \alpha - \frac{X}{r \cos^3 \alpha} = -3 \operatorname{tg} \alpha \text{ [d'après (5) et (7)]}$$

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\left( \frac{dY}{dX} \right)_2 - \left( \frac{dY}{dX} \right)_1}{1 + \left( \frac{dY}{dX} \right)_2 \left( \frac{dY}{dX} \right)_1} = \frac{8 \sin^3 \alpha \cos \alpha}{-8 \sin^4 \alpha + 4 \sin^2 \alpha + 1}$$

D'où

$$\cos \theta = \frac{-8 \sin^4 \alpha + 4 \sin^2 \alpha + 1}{\sqrt{8 \sin^2 \alpha + 1}}$$

En remplaçant dans l'expression de  $V_b^2$ , il vient :

$$(8) \quad V_b^2 = 16rg \cos \alpha \sin^4 \alpha \\ \text{ou } V_b = 4 \sqrt{dg \cos \alpha (1 - \cos^2 \alpha)}$$

Efficacité maximum.

$$\frac{d(V_b)}{d(\cos \alpha)} = 4 \sqrt{dg} (1 - 3 \cos^2 \alpha) = 0$$

$$(9) \quad \cos \alpha_m = \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \alpha_m = 54,7^\circ$$

Remarque : On peut obtenir directement  $\alpha_m$  :

Hauteur de chute :  $h = Y_1 - Y_0$  ( $Y_1$  étant l'ordonnée du sommet de la parabole).

En faisant  $\frac{dY}{dX} = 0$  dans (5), on obtient :

$$Y_1 = \frac{r \sin^2 \alpha \cos \alpha}{2}$$

D'après (7), on a :  $-Y_0 = 4r \sin^2 \alpha \cos \alpha$

$$\text{D'où : } h = \frac{9r}{2} \sin^2 \alpha \cos \alpha$$

Pour la hauteur de chute maxima,  $\frac{dh}{d\alpha} = 0$

On trouve :  $\cos^2 \alpha = \frac{1}{3}$

D'après (3) et (4), on a pour l'efficacité maxima :

$$\cos \alpha_m = \frac{r}{d} = \frac{rn^2}{893} = \frac{1}{\sqrt{3}}$$

A la vitesse critique  $n'$ , on a d'après (6)

$$\frac{rn'^2}{893} = 1$$

d'où

$$(10) \quad \frac{n_m}{n'} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,76$$

C'est-à-dire que pour un rayon donné, l'efficacité maxima est obtenue pour 76 % de la vitesse critique.

(Certains ingénieurs préconisent de faire tourner les tubes à 75 % de la vitesse critique des boulets extérieurs.)

Direction de la vitesse relative de chute  $V_b$ .

En calculant  $v_1 = v_t - v' = v \cos \theta - v'$ , on trouve :

$$v_1 = 4 \sqrt{rg} \cos \alpha \sin^2 \alpha \cos 2\alpha.$$

Posons  $\theta_1 = (v', V_b)$  (fig. 67)

$$\cos \theta_1 = \frac{v_1}{V_b} = \cos 2\alpha \text{ [d'après (8)]}.$$

D'où :

$$\theta_1 = 2\alpha$$

Or nous avons vu que  $(Oy', OQ) = \pi - 3\alpha$

Il en résulte que :

$$(11) \quad (Ox, V_b) = -\alpha$$

Normale à la courbe des points de chute (C).

Soient :

QT la tangente à (C) (fig. 68);

QN la normale à (C);

PT' la tangente au cercle de diamètre OA;

QT' la tangente au cercle de centre O et de rayon OQ.

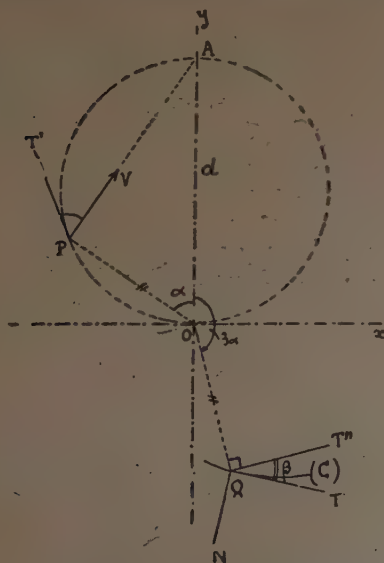


FIG. 68.

On a  $(PA, PT') = \alpha$

Posons  $(QT', QT) = \beta$

Nous avons vu que  $(Oy, OQ) = 3\alpha$

Si  $\alpha$  prend un accroissement  $d\alpha$ ,  $r (= OP = OQ)$  prend un accroissement  $dr$  et  $(Oy, OQ)$  prend un accroissement  $3d\alpha$ .

Il en résulte que  $\text{tg } \beta = \frac{\text{tg } \alpha}{3}$

$$\text{tg}(Ox, QT) = \text{tg}(\pi - 3\alpha - \beta) = -\text{tg}(3\alpha + \beta)$$

$$\frac{\text{tg } 3\alpha + \frac{\text{tg } \alpha}{3}}{\frac{\text{tg } 3\alpha \text{ tg } \alpha}{3} - 1} = \frac{6 \text{ tg}^3 \alpha - 10 \text{ tg } \alpha}{\text{tg}^4 \alpha - 12 \text{ tg}^2 \alpha + 3}$$

$$(12) \quad \text{tg}(Ox, N) = \frac{-\text{tg}^4 \alpha + 12 \text{ tg}^2 \alpha - 3}{6 \text{ tg}^3 \alpha - 10 \text{ tg } \alpha}$$

Angle de  $V_b$  avec la normale QN.

$$\text{tg}(V_b, N) = \text{tg}[(Ox, N) - (Ox, V_b)]$$

Or

$$(Ox, V_b) = -\alpha \text{ [d'après (11)]}.$$

D'où

$$(13) \quad \text{tg}(V_b, N) = \frac{5 \text{ tg}^4 \alpha + 2 \text{ tg}^2 \alpha - 3}{\text{tg } \alpha (\text{tg}^4 \alpha - 6 \text{ tg}^2 \alpha - 7)}$$

Parabole minima.

C'est celle qui correspond à un angle

$$(V_b, N) = \frac{\pi}{2}$$

$$\text{tg}^4 \alpha_1 - 6 \text{ tg}^2 \alpha_1 - 7 = 0$$

D'où

$$\text{tg } \alpha_1 = \sqrt{7}$$

$$\alpha_1 = 69,3^\circ$$

$$(14) \quad r_1 = d \cos \alpha_1 = 0,354d$$

Remarque : le point Q' correspondant est voisin du point où le limaçon a une tangente verticale.

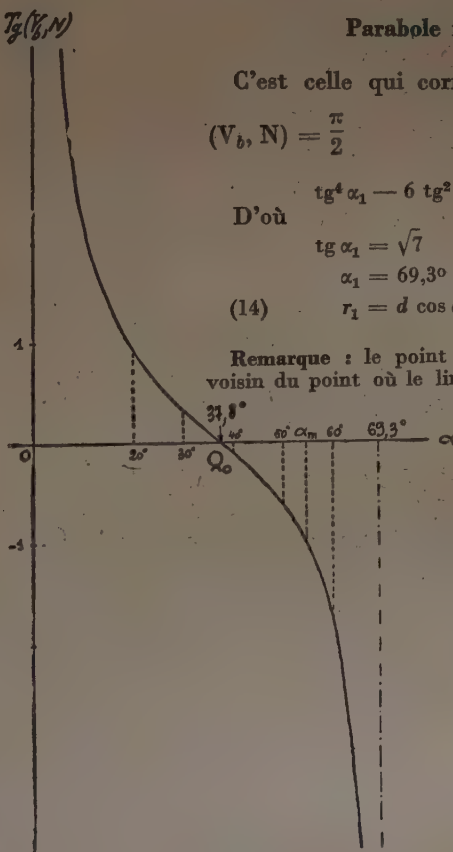


FIG. 69.

En effet, si

$$(Ox, N) = 0$$

$$\text{tg}^4 \alpha - 12 \text{ tg}^2 \alpha + 3 = 0 \text{ [d'après (12)]};$$

$$\text{D'où : } \alpha = 73,7^\circ$$

(La deuxième solution  $\alpha = 27^\circ$  correspond au point le plus à droite du limaçon.)

Si l'on trace la courbe représentative de  $\text{tg}(V_b, N)$  en fonction de  $\alpha$  (fig. 69), de 0 à  $69,3^\circ$ , on obtient une courbe à

2 asymptotes, qui coupe l'axe  $Ox$  au point  $Q_0$  ( $\alpha_0 = 37,8^\circ$ ) correspondant à une vitesse de chute relative normale au limacon.

On obtient ce point en annulant  $\text{tg}(V_b, N)$  ce qui donne

$$(15) \quad \text{tg}^2 \alpha_0 = \frac{3}{5}$$

## 2° CLASSEMENT DES BOULETS

77. — Si, pour la paroi du tube  $\alpha_R > 37,8^\circ$  (c'est-à-dire pour une vitesse de rotation modérée) la partie utile de la courbe  $[\text{tg}(V_b, N)]$  (fig. 69) est tout entière à droite de  $Q_0$ .

Il en résulte que les plus gros boulets ont tendance à rouler vers la périphérie du tube après leur chute, et à s'y classer progressivement (les plus petits boulets roulent évidemment moins que les gros. Leur classement vers le centre s'effectue donc indirectement).

Si, pour la paroi du tube,  $\alpha_R < 37,8^\circ$ , la partie utile de la courbe  $[\text{tg}(V_b, N)]$  commence à gauche du point  $Q_0$ .

Il en résulte que les plus gros boulets ont tendance à rouler en s'éloignant de la périphérie du tube après leur chute, et à se classer vers le centre.

## 3° TRAVAIL DE BROUAGE

78. — Soient  $L$  la longueur du tube et  $\delta$  la densité apparente de la charge.

Considérons la charge comprise entre les rayons

$$r \quad \text{et} \quad r + dr$$

Elle parcourt sa trajectoire circulaire à une vitesse

$$(1) \quad V = r\omega$$

En une seconde, une masse de  $L\delta r\omega dr$  exerce un travail de broyage en tombant sur la courbe (C) [ou plus exactement sur la surface (C)].

$$\text{Ce travail est } \frac{1}{2} (L\delta r\omega dr) V_b^2$$

Le travail total de broyage de la charge comprise entre les rayons  $R'$  et  $R$  est donc :

$$T_{R'}^R = \int_{R'}^R \frac{1}{2} (L\delta r\omega dr) V_b^2$$

Or

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{d}} \quad [\text{d'après (2) et (3)}]$$

et

$$V_b^2 = 16rg \frac{r}{d} \left(1 - \frac{r^2}{d^2}\right)^2 \quad [\text{d'après (8) et (3)}].$$

D'où

$$(16) \quad T_{R'}^R = \frac{L\delta g^{3/2}}{3d^{11/2}} (3r^8 - 8d^2r^6 + 6d^4r^4)_{R'}^R$$

En particulier, entre les rayons  $r_1 [= 0,354 d]$ , d'après (14)] et  $R$ ,

$$(17) \quad T_{r_1}^R = \frac{L\delta g^{3/2}}{3} \left[ 3R^8 d^{\frac{11}{2}} - 8R^6 d^{\frac{7}{2}} + 6R^4 d^{\frac{3}{2}} - 0,0787d^{\frac{5}{2}} \right]$$

## Travail de broyage maximum.

Quand on fait varier la vitesse de rotation  $n$  on a :

$$n = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g}{d}} \quad [\text{d'après (2), (3) et (4)}].$$

Par conséquent  $d$  varie. Donc  $T_{r_1}^R$  aussi.

En traçant la courbe représentative de  $T_{r_1}^R$  en fonction de  $d$ , on voit qu'il existe un maximum pour lequel

$$\frac{dT_{r_1}^R}{dd} = 0 \quad (\text{fig. 70})$$

ou

$$\frac{L\delta g^{3/2}}{3d^{\frac{13}{2}} R^8} \left( -16,5 + 28 \frac{d^2}{R^2} - 9 \frac{d^4}{R^4} - 0,197 \frac{d^6}{R^6} \right) = 0$$

Posons :

$$Z = -16,5 + 28 \frac{d^2}{R^2} - 9 \frac{d^4}{R^4} - 0,197 \frac{d^6}{R^6}$$

En traçant la courbe représentative de  $Z$ , on voit qu'elle coupe l'axe des  $d$  en

$$(18) \quad \left\{ \begin{array}{l} d = 1,42R \\ \text{correspondant à } n = \frac{25}{\sqrt{R}} = \frac{35,4}{\sqrt{D}} \end{array} \right.$$

On a préconisé depuis longtemps une vitesse telle que les boulets extérieurs frappent la paroi à  $45^\circ$  au-dessous de l'axe, ce qui donne :

$$n = \frac{25}{\sqrt{R - \rho}}$$

si  $\rho$  est le rayon des boulets.

## D. — CALCUL DE LA CHARGE

### 1° CYCLE DE LA CHARGE

79. — Chaque particule décrit :

Un arc de cercle d'angle au centre  $2\pi - 4\alpha$

Et un arc de parabole vue du centre sous l'angle  $4\alpha$

Temps de révolution du tube :

$$T_r = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{60}{n} \quad (\text{en secondes}).$$

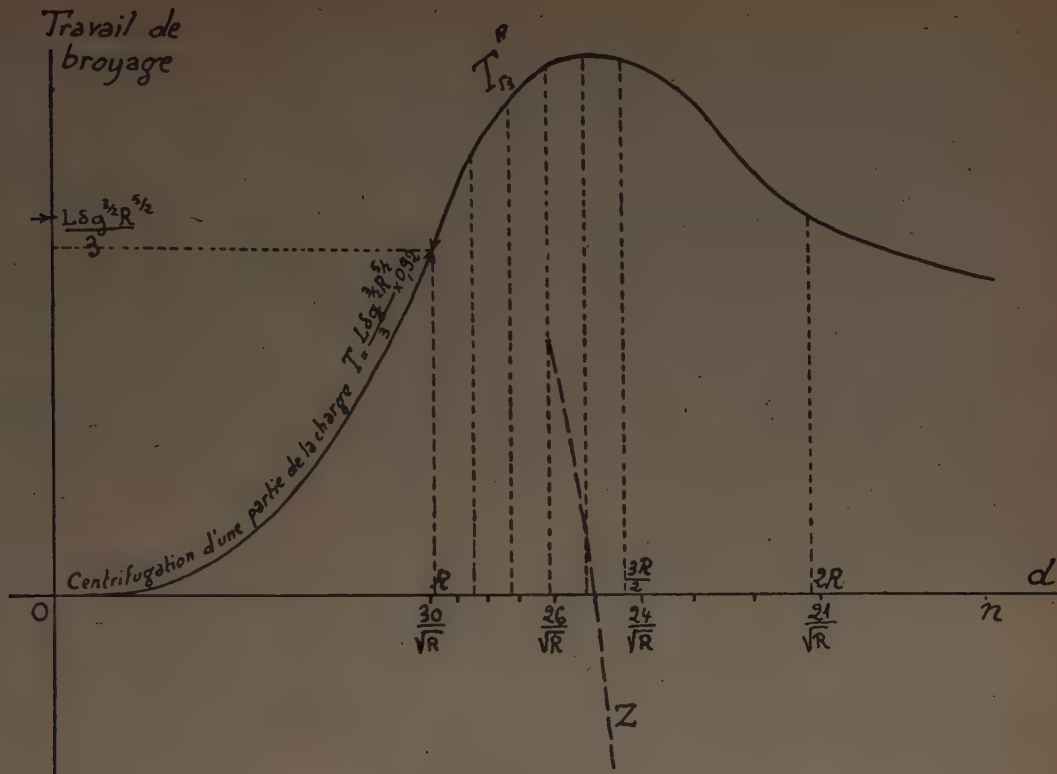


FIG. 70.

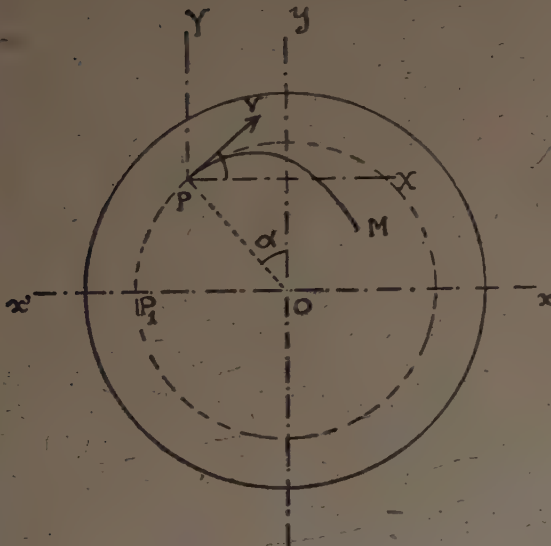


FIG. 71.

Temps de parcours de l'arc de cercle :

$$T_c = \frac{2\pi - 4\alpha}{2\pi} T_r$$

Temps de parcours de l'arc de parabole :

$$T_p = \frac{X_0}{V \cos \alpha} = \frac{2 \sin \alpha \cos \alpha}{\pi} T_r \text{ [d'après (7)].}$$

Temps de parcours du cycle d'une particule :

$$(19) \quad T = T_c + T_p = \frac{\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi} T_r$$

## 2° VOLUME APPARENT DE LA CHARGE

30. — Soit L la longueur du tube.

L'angle au centre des trajectoires circulaires décrites par la charge entre les rayons  $r$  et  $r + dr$  est  $2\pi - 4\alpha$ .

Le volume de cette charge, décrivant les cercles et les paraboles correspondantes, est :

$$(2\pi - 4\alpha) \frac{T}{T_c} r dr L = 2L (\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha) r dr$$

Entre les rayons  $R'$  et  $R$ , le volume de la charge est donc :

$$V = 2L \int_{R'}^R (\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha) r dr$$

En remplaçant  $r$  par sa valeur  $d \cos \alpha$  [d'après (3)] il vient :

$$(2\alpha) \quad V = -\frac{Ld^3}{2} \int_{\alpha_r'}^{\alpha_r} \sin 2\alpha (\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha) d(2\alpha)$$

En intégrant (par parties), on trouve :

$$V_{R'} = \frac{Ld^2}{2} \left[ \cos 2\alpha (\pi - 2\alpha) - \alpha + \sin 2\alpha + \frac{\sin 4\alpha}{4} \right]_{\alpha_R'}^{\alpha_R}$$

D'où le degré de remplissage :

$$(20) \Delta = \frac{\text{volume apparent de la charge}}{\text{volume du tube}} = \frac{d^2 \left[ \cos 2\alpha (\pi - 2\alpha) - \alpha + \sin 2\alpha + \frac{\sin 4\alpha}{4} \right]_{\alpha_R'}^{\alpha_R}}{2\pi R^2}$$

### 3° MÉLANGE DE LA CHARGE

81. — Considérons un rayon initial  $Ox'$  d'un tube tournant à la vitesse critique (fig. 71).

a) Transformation d'un rayon pendant le parcours des paraboles.

Au bout d'un certain temps  $t$ , les différentes particules  $P_1$  du rayon  $Ox'$  ont parcouru un arc de cercle  $P_1P$  pendant

$$\frac{\frac{\pi}{2} - \alpha}{\omega} \text{ secondes, et un arc de parabole PM pendant } \frac{X}{V \cos \alpha}$$

$$= \frac{X}{r\omega \cos \alpha} \text{ secondes.}$$

$$t = \frac{\frac{\pi}{2} - \alpha}{\omega} + \frac{X}{r\omega \cos \alpha}$$

En remplaçant  $X$  par sa valeur dans ces formules, on trouve :

$$x_t = d \cos \alpha \left[ \cos \alpha \left( \omega t - \frac{\pi}{2} + \alpha \right) - \sin \alpha \right]$$

$$y_t = d \cos \alpha \left[ \left( \omega t - \frac{\pi}{2} + \alpha \right) \left( \sin \alpha - \frac{\omega t - \frac{\pi}{2} + \alpha}{2 \cos \alpha} \right) + \cos \alpha \right]$$

Ce sont les coordonnées paramétriques des courbes cherchées [par exemple  $(R_4)$ ] (fig. 72).

En calculant  $dx$  et  $dy$ , on obtient la pente de la tangente à ces courbes

$$\left( \frac{dy}{dx} \right)_t = \frac{2 \sin \alpha \left( \omega t - \frac{\pi}{2} + \alpha \right) + \cos \alpha}{2 \cos \alpha \left( \omega t - \frac{\pi}{2} + \alpha \right) - \sin \alpha}$$

En particulier, au point de chute  $Q$ , on a :

$$t = \frac{\frac{\pi}{2} - \alpha}{\omega} + \frac{4 \sin \alpha \cos \alpha}{\omega}$$

D'où :

$$\omega t - \frac{\pi}{2} + \alpha = 4 \sin \alpha \cos \alpha$$

et

$$\left( \frac{dy}{dx} \right)_Q = \frac{(8 \sin^2 \alpha + 1) \cos \alpha}{(8 \cos^2 \alpha - 1) \sin \alpha}$$

Pour le point  $Q_0$  défini par la formule (15) on a :

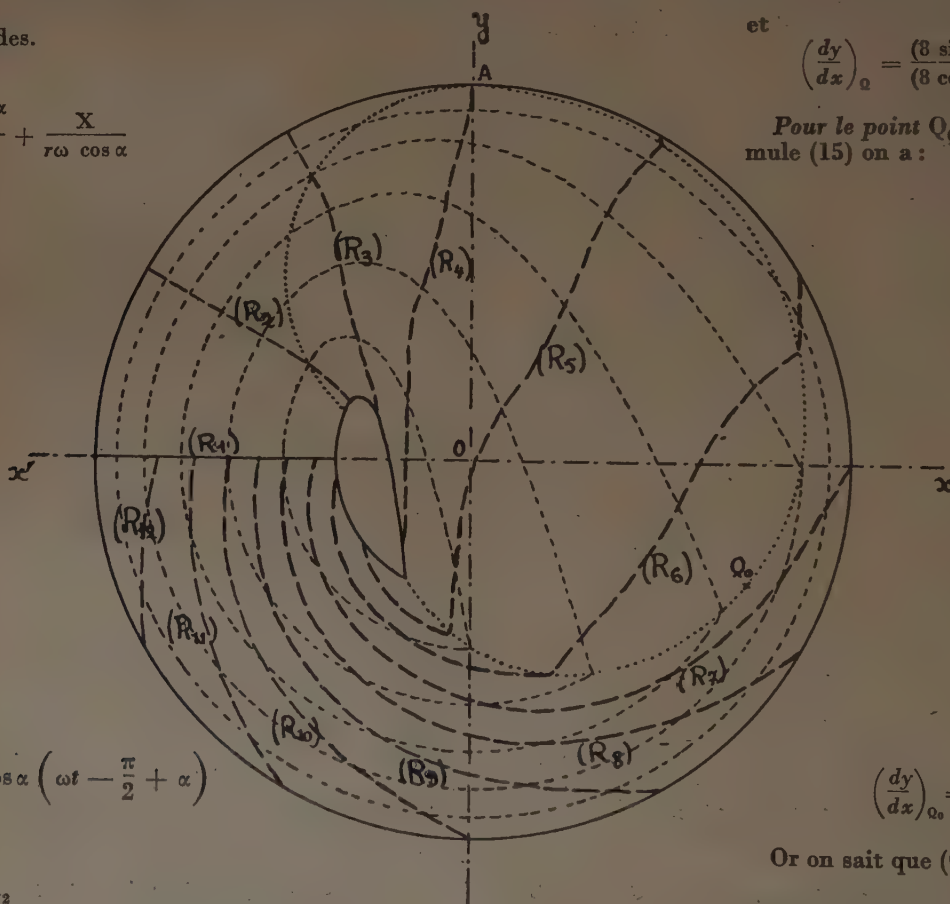


FIG. 72.

$$\text{D'où } X = r \cos \alpha \left( \omega t - \frac{\pi}{2} + \alpha \right)$$

Or

$$x = X - r \sin \alpha$$

$$y = X \tan \alpha - \frac{X^2}{2r \cos^3 \alpha} + r \cos \alpha \text{ [d'après (5)]}$$

$$\left( \frac{dy}{dx} \right)_{Q_0} = \cotg \alpha$$

Or on sait que  $(Ox, V_b) = -\alpha$  (d'après 11).

Par conséquent, en ce point  $Q_0$  la courbe  $(R)$  est tangente au limaçon.

Remarque : Il est facile de tracer les courbes (R) en appliquant aux paraboles la formule :

$$\frac{dX}{dt} = V \cos \alpha$$

b) Transformation d'un rayon après le parcours des paraboles.

La formule (19) donne le temps de parcours du cycle d'une particule :

$$T = \frac{\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi} T_r \left( \text{avec } T_r = \frac{2\pi}{\omega} \right)$$

Supposons qu'après avoir parcouru un cycle elle reste sur sa trajectoire circulaire. Au bout du temps  $T_r$  elle se trouvera en  $P'$  dont les coordonnées polaires sont (fig. 73) :

$$\begin{aligned} OP' &= r = d \cos \alpha \\ (Ox', OP') &= \psi = (T_r - T) \omega \\ &= 2(2\alpha - \sin 2\alpha) \end{aligned}$$



FIG. 73.

Le rayon initial s'est donc transformé en une courbe en spirale (fig. 72).

Remarque : Cherchons le point où le limaçon (C) est tangent à une spirale :

Pour le même rayon polaire  $r = d \cos \alpha$  (de pôle O),

L'angle polaire du limaçon est  $3\alpha$ ;

L'angle polaire de la spirale est  $2(2\alpha - \sin 2\alpha)$ .

Si les deux courbes sont tangentes, on a :

$$\begin{aligned} 3d\alpha &= 4d\alpha - 4 \cos 2\alpha d\alpha \\ \cos 2\alpha &= \frac{1}{4} \end{aligned}$$

D'où :

$$\operatorname{tg}^2 \alpha = \frac{3}{5}$$

On retrouve bien le point  $Q_0$  [formule (15)].

La charge effective des cycles d'autant plus nombreux qu'elle est plus près du centre. Il en résulte un mélange constant des boulets et des matières à broyer, bien que chaque boulet reprenne théoriquement toujours le même cercle.

4° DEGRÉ DE REMPLISSAGE OPTIMUM

82. — Nous avons vu que pour le travail de broyage total maximum

$$d = 1,42R \text{ [formule (18)]}$$

ou

$$\cos \alpha_R = \frac{R}{d} = \frac{1}{1,42} \text{ [d'après (3)]}$$

$$\text{D'où } \alpha_R = 45,3^\circ$$

Nous avons vu d'autre part que pour la parabole minima :

$$\alpha_1 = 69,3^\circ \text{ [d'après (14)]}$$

En appliquant la formule (20) à  $\alpha_1$  et  $\alpha_R$ , on trouve :

$$(21) \quad \Delta = 0,45$$

[Des études expérimentales minutieuses ont conduit FAHRENWALD et LEE, aux États-Unis, à adopter comme degré de remplissage optimum 0,42. Il est compréhensible en effet qu'il vaille mieux rester un peu au-dessous du nombre 0,45 pour éviter les mouvements désordonnés de la charge vers le centre (n° 84), surtout si la vitesse n'est pas rigoureusement contrôlée.]

Remarque : Le rayon qui donne l'efficacité maxima est :

$$r_m = \frac{d}{\sqrt{3}} \text{ [d'après (9) et (3)]}$$

Pour la vitesse optima, on a :

$$\frac{r_m}{R} = \frac{1,42}{\sqrt{3}} = 0,82$$

L'efficacité maxima est obtenue pour  $r_m = 0,82 \times R$

5° POIDS DE LA CHARGE DE BOULETS

83. — a) Volume absolu maximum de boulets égaux dans un grand cube d'arête  $a$  :

Soit  $\Delta$  le diamètre des boulets.

La première couche de boulets est rangée comme l'indique la figure 74; les centres des boulets de la couche immédiatement supérieure forment avec les centres tels que  $O_1O_2O_3$  des tétraèdres réguliers de hauteur

$$\frac{\Delta \sqrt{2}}{\sqrt{3}}$$

Nombre de boulets dans une ligne :  $\frac{a}{\Delta}$

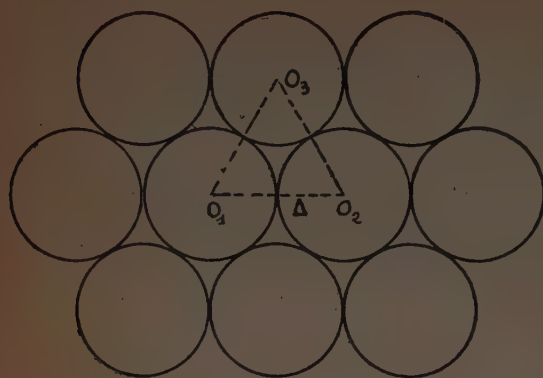


FIG. 74.

Nombre de lignes dans une couche :  $\frac{2a}{\Delta\sqrt{3}}$

Nombre de couches :  $\frac{a\sqrt{3}}{\Delta\sqrt{2}}$

Nombre de boulets dans le cube :  $\frac{a^3}{\Delta^3}\sqrt{2}$

Volume total des boulets :  $\frac{a^3}{\Delta^3}\sqrt{2} \times \frac{\pi\Delta^3}{6} = \frac{\pi\sqrt{2}}{6} a^3$

Compacité :  $\frac{\pi\sqrt{2}}{6} = 0,74$

#### b) Volume absolu pratique.

Dans le tube les boulets ne sont évidemment pas idéalement rangés et la compacité est voisine de 0,60.

Les boulets ont donc pour densité apparente :

$$0,60 \times 7,7 = 4,6$$

(et les galets  $0,60 \times 2,7 = 1,6$ )

#### c) Poids des boulets.

Exemple : Tube de diamètre : 1,50 m ;

— de longueur : 5 m ;

Degré de remplissage = 0,45 (n° 81).

Poids maximum de la charge de boulets :

$$5 \times \left(\frac{\pi}{4} \times 2,25\right) \times 0,45 \times 4,6 = 18 \text{ t}$$

#### d) Poids des matériaux à broyer.

Pour une efficacité maxima, leur volume apparent sera évidemment égal au vide entre les boulets.

EXEMPLE : Densité apparente  $\delta = 1,2$

Poids des matériaux à broyer :

$$5 \times \left(\frac{\pi}{4} \times 2,25\right) \times 0,45 \times 0,40 \times 1,2 = 1,9 \text{ t}$$

## E. — GLISSEMENT

84. — Nous avons supposé jusqu'à présent que les boulets périphériques ne glissaient pas sur la paroi du cylindre et qu'ils ne décrivaient que des arcs de cercle et de parabole.

En réalité les boulets glissent souvent sur la paroi, à moins qu'elle ne soit ondulée, et ils roulent toujours un peu en cascade le long de la courbe (C) (lieu des points de chute).

On étudie indirectement le glissement au moyen de la puissance nécessaire à la rotation du broyeur. En effet, si l'on porte en abscisse la vitesse et en ordonnée cette puissance, on obtient une courbe qui présente généralement une partie verticale correspondant à la vitesse de centrifugation des boulets périphériques (fig. 75).

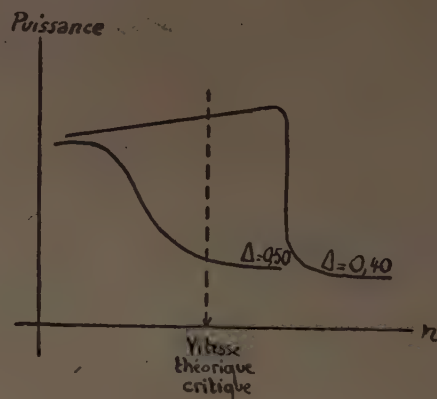


FIG. 75.

En comparant cette vitesse à la vitesse critique théorique de ces boulets  $n = \frac{30}{\sqrt{R - \rho}}$  [d'après (4)], on peut mesurer le glissement.

On constate que :

1° Le glissement est d'autant plus grand que le degré de remplissage  $\Delta$  est plus faible. GROSS (aux États-Unis) a montré qu'il s'annule aux environs de  $\Delta = 0,45$ . C'est précisément le degré de remplissage optimum que nous avons trouvé [formule (21)].

Pour une charge très faible, on conçoit en effet que les boulets roulent simplement les uns sur les autres; si la charge augmente, le glissement ne peut que décroître et il est compréhensible qu'il s'annule quand le remplissage est maximum. Si l'on dépasse ce degré de remplissage maximum, il se produit au centre du tube des mouvements parasites désordonnés.

2° Pour les faibles charges :

a) Le glissement croît avec la dilution de la matière, une matière peu diluée forme une sorte de pâte « raide »

b) Si l'on fait varier le rapport  $Z = \frac{\text{charge à broyer}}{\text{charge de boulets}}$  le glissement passe par un minimum quand la charge à broyer remplit juste les interstices entre les boulets.

Remarque : Toute la théorie du tube mill qui précède n'est valable que si le mouvement de la charge a atteint ce qu'on peut appeler son état d'équilibre.

La courbe de variation de la puissance demandée au moteur en fonction du temps prouve que cet état n'est atteint qu'après plusieurs minutes de marche (fig. 76).

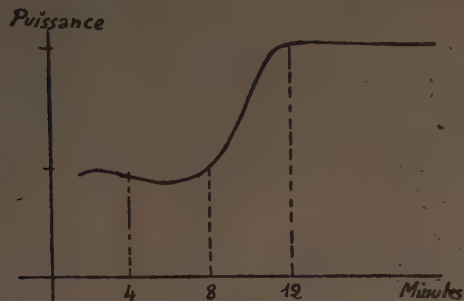


FIG. 76.

## F. — RÉSUMÉ DE LA THÉORIE DU BROEUR A BOULETS

Chaque particule décrit un arc de cercle et un arc de parabole.

Les origines des paraboles sont sur un cercle de diamètre :

$$d = \frac{893}{n^2}$$

Les points de chute sont sur un limaçon de PASCAL.

L'efficacité maxima est obtenue pour  $r_m = \frac{d}{\sqrt{3}}$

La parabole minima correspond à :  $r_1 = 0,354d$

Le travail de broyage est maximum pour une vitesse  $n = \frac{35,4}{\sqrt{D}}$  et un degré de remplissage  $\Delta = 0,45$  (et dans ce cas le glissement est nul).

## VI. — APPAREILS A PERCUSSION

### A. — APPAREILS A MARTEAUX

#### Caractéristiques.

85. — Diamètre intérieur : 0,60 à 2 m ;

Largeur : 0,30 à 2 m ;

Vitesse :  $n = 800$  à  $5\,000$  tours/minutes ;

Débit : jusqu'à  $200$  t/h.

Les marteaux sont fixes ou articulés (fig. 77).

Ils ont la forme d'un fléau ou la forme d'un « U ».

Suivant les appareils, ils sont au nombre de 3 à 64 (dont plusieurs sur le même axe).

Ils pèsent de 1 à 20 kg.

Soit  $H$  la hauteur de chute des matériaux avant qu'ils soient frappés par les marteaux. Leur vitesse est alors :

$$v = \sqrt{2gH}$$

Or si  $N$  est le nombre d'axes portant des marteaux, le temps qui s'écoule entre le passage de deux marteaux successifs est  $\frac{60}{nN}$

La hauteur parcourue par les matériaux pendant ce temps est donc :

$$\frac{60}{nN} \times \sqrt{2gH}$$

C'est la hauteur utile  $h$  des marteaux.

Exemple :  $n = 1\,500$  t/mn ;  
 $N = 6$  marteaux ;  
 $H = 0,40$  m.

On trouve :  $h \approx 2$  cm.

Avec  $N = 3$ , on trouve  $h \approx 4$  cm.

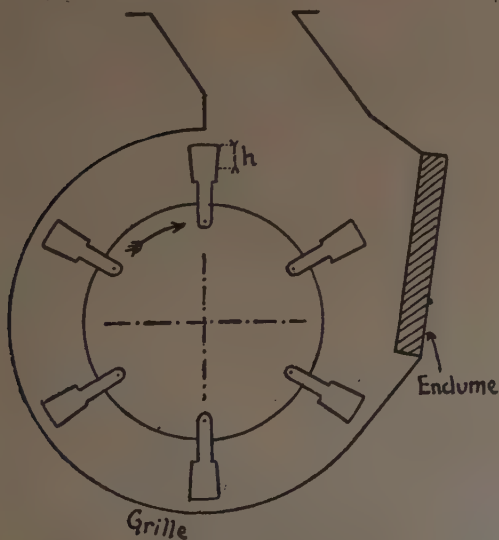


FIG. 77.

La hauteur utile des marteaux est donc faible. Il en résulte assez rapidement la formation d'un biseau à l'endroit du choc.

Les matériaux sont ensuite attaqués de biais par ce biseau et l'usure s'en trouve accentuée. C'est pourquoi les appareils à marteaux ne peuvent pas être utilisés pour fragmenter des roches contenant plus de 10 % de silice.

## B. — APPAREILS A TUYÈRE

86. — Ils ont été étudiés aux États-Unis. Leur principe est le même que celui des appareils à marteaux en ce qui concerne le choc sur l'enclume, mais les matériaux sont projetés sur cette enclume par un jet de vapeur ou d'air comprimé.

## C. — APPAREILS A EXPLOSION

87. — Ils ont été étudiés aussi aux États-Unis.

Ils comprennent essentiellement une chambre d'explosion dans laquelle on introduit du minerai imprégné d'eau surchauffée, sous pression (15 kg environ). L'ouverture d'une soupape provoque ensuite une détente brusque qui crée une onde d'expansion. Les matériaux éclatent.

Ils se fragmentent aussi en frappant les parois de la chambre.

De plus, la haute température facilite la désagrégation par dilatation thermique.

## VII. — APPAREILS A MEULES

### A. — MOULIN CHILIEN

88. — Il comprend une cuve circulaire horizontale contenant les matériaux à broyer, et une, deux ou trois meules d'axe horizontal, tournant autour de l'axe vertical de la cuve.

#### Caractéristiques.

*Diamètre de la cuve* : jusqu'à 3 m;

*Diamètre des meules* : jusqu'à 1,50 m;

*Largeur des meules* : jusqu'à 0,50 m;

*Vitesse* : 8 à 35 tours/minute.

L'écrasement se fait grâce au poids des meules et grâce à leur mouvement de râpe.

### B. — APPAREILS PENDULAIRES

1° Cloche (fig. 78).

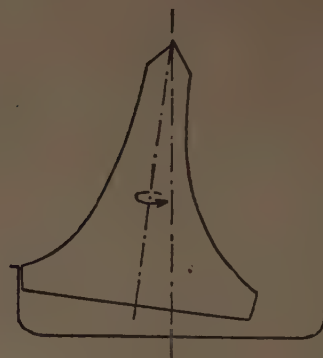


FIG. 78.

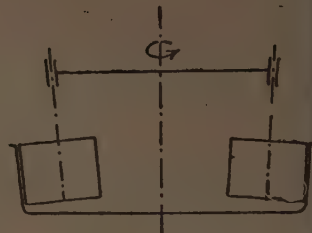


FIG. 79.

*Diamètre* : jusqu'à 1,50 m;

*Vitesse* : jusqu'à 100 tours/minute.

2° Pendules multiples (fig. 79).

*Diamètre des rouleaux* : jusqu'à 0,60 m;

*Vitesse* : jusqu'à 90 tours/minute.

## VIII. — APPAREILS A PILONS

89. — Ils ont surtout été utilisés pour broyer les minerais aurifères. Ils sont peu à peu abandonnés.

IV. — APPAREILS COMBINÉS

90. — Les constructeurs de tous les pays ont souvent cherché à grouper plusieurs appareils dans une même machine (par exemple en actionnant deux giratoires superposés, ou deux mâchoires superposées, avec un seul excentrique).

La plupart de ces appareils ont été abandonnés.

Citons cependant le *broyeur à boulets à compartiments* :

L'expérience montre que la surface des corps broyants doit être comprise entre  $1/100^e$  et  $1/500^e$  de la surface des matières à broyer. Les boulets doivent donc être d'autant plus petits et plus nombreux que la matière à broyer est plus fine (voir n° 125).

Le *tube Compound* est conforme à ce principe : la matière y passe successivement dans différents compartiments en traversant des cribles qui empêchent les boulets de passer.

REMARQUE : Le *broyeur Hardinge* est ce qu'on pourrait appeler un *tube Compound différentiel* (fig. 80).

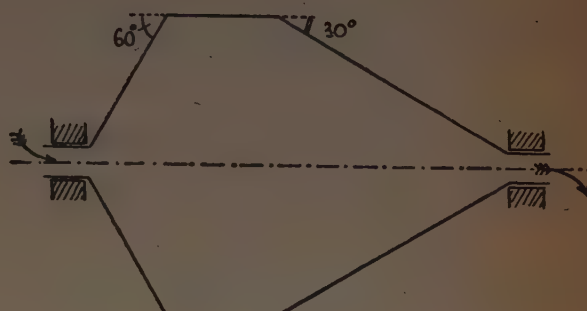


FIG. 80.

Grâce à la forme conique du tube, les boulets se classent d'eux-mêmes en grosseurs décroissantes de l'entrée à la sortie, pour une vitesse de rotation convenable chassant les gros à la périphérie (partie cylindrique du broyeur) et les petits au centre (partie conique) (voir n° 77).

## CHAPITRE IV

### LOIS DE LA FRAGMENTATION

Le problème industriel de la fragmentation consiste à produire un matériau dont on impose la granulométrie (ou la surface spécifique), la forme, le débit et le prix de revient.

Nous ne pouvons étudier dans ce chapitre que les principes généraux permettant de résoudre ce problème le mieux possible, mais chaque détail de l'installation peut avoir une influence considérable sur l'ensemble.

#### I. — TRAVAIL ET RENDEMENT DE LA FRAGMENTATION

##### A. — LOI DE RITTINGER

91. — Le travail de fragmentation d'une roche est proportionnel à la nouvelle surface produite.

##### 1<sup>o</sup> VÉRIFICATION SUR LE QUARTZ

RITTINGER a tenté de justifier cette loi (vers 1867) en mesurant la surface des fragments par mouillage (voir n<sup>o</sup> 16). Mais ce n'est que depuis une vingtaine d'années qu'on a pu la vérifier avec une précision suffisante. En particulier GROSS, aux États-Unis, en utilisant la « machine à poids » comme broyeur (n<sup>o</sup> 41) et la méthode de dissolution par l'acide fluorhydrique pour mesurer la surface des fragments (n<sup>o</sup> 14), a trouvé pour des conditions opératoires variées les résultats suivants :

DIMENSION MOYENNE INITIALE	NOUVELLE SURFACE PRODUITE
(mm)	C (cm <sup>2</sup> /kgcm)
5,69	18,2
1,41	19 16,8 18,9 17,3 16,8 17,5
0,711	17,0 (16,1)
0,356	18,1 18,7 19,0
0,178	(16,1)

NOTA. — Les deux nombres entre parenthèses proviennent d'expériences douteuses.

La moyenne de C est

$$C_0 = 17,6 \text{ cm}^2/\text{kgcm}$$

[Nous avons vu (n<sup>o</sup> 42) que c'est la Constante de Rittinger, surface produite par unité de travail].

Son écart probable (moyenne des écarts  $|C - C_0|$ ) est 0,93, c'est-à-dire 5 % de  $C_0$ . Cet écart peut provenir :

d'une part de l'erreur commise sur le travail de broyage (en particulier, on ne tient pas compte des pertes de chaleur, dans la « machine à poids »),

d'autre part de l'erreur commise sur la mesure de la surface produite (on mesure la surface des fragments avant et après le broyage).

Enfin toutes les mesures sont obligatoirement faites sur des parties distinctes de l'échantillon de quartz, et il faut supposer que toutes ces parties sont identiques. Or il existe toujours des petites différences d'échantillonnage.

On peut donc dire que la vérification est très satisfaisante.

##### 2<sup>o</sup> VÉRIFICATION SUR LA MAGNÉTITE

92. — GROSS utilise la « machine à poids » comme broyeur, et la force coercitive de la magnétite de l'Oural pour calculer sa surface (n<sup>o</sup> 15).

En portant en abscisse le travail T et en ordonnée la force coercitive F, il trouve une droite qui coupe l'axe

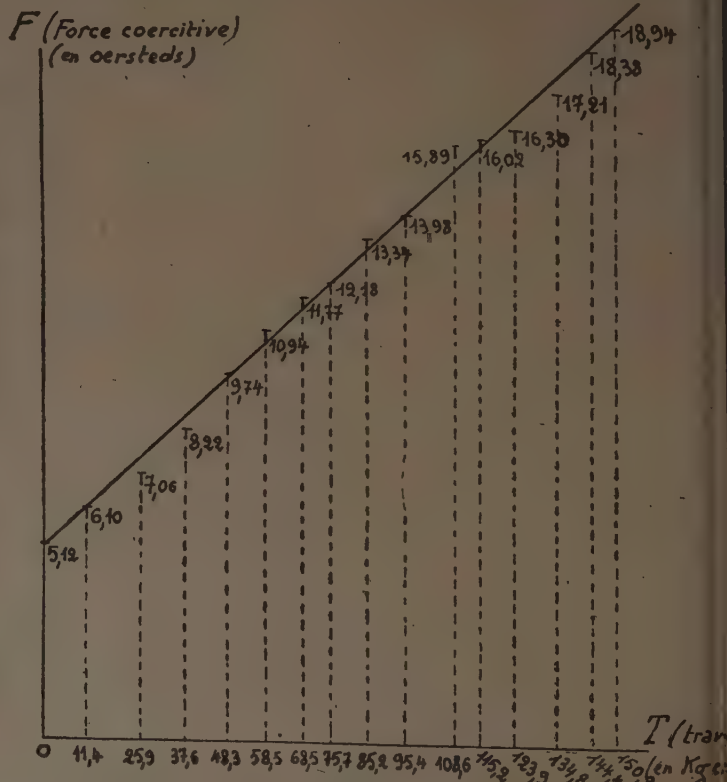


FIG. 81.

des ordonnées en un point correspondant à la force coercitive  $F_0$  de l'échantillon non broyé (fig. 81).

On trouve ainsi comme valeur moyenne pour le rapport  $M = \frac{T}{F - F_0}$  la valeur 10,7 (en affectant à chaque valeur de  $M$  un « poids » proportionnel à  $T$ ).

On voit sur la figure 81 que l'écart probable est faible et que la vérification est très satisfaisante.

La loi de RITTINGER n'a pu être vérifiée avec précision jusqu'ici que pour le quartz et la magnétite (qui sont structuralement homogènes).

Nous considérerons qu'elle est exacte pour toutes les roches.

### 3° VARIATION DE LA CONSTANCE DE RITTINGER

93. — a) Nous avons vu (n° 42) que cette constante est une caractéristique mécanique de la roche. Par exemple dans les conditions de mesure exposées aux nos 5, 13, 19 et 41 on trouve les valeurs suivantes :

Quartz .....	17,6 cm <sup>2</sup> /kg cm
Pyrite .....	22,7 —
Sphalérite .....	56,3 —
Calcite .....	76,1 —
Galène .....	94,8 —

(On peut admettre que la magnétite a à peu près la même constante de RITTINGER que la pyrite.)

Remarque : La chaleur de solution du sel gemme dépend de la dimension de ses fragments.

Soient :  $\Theta$  la chaleur de solution de fragments de dimension  $D$  et de surface spécifique  $S$ .

$\theta$  la chaleur de solution de fragments de dimension  $d$  et de surface spécifique  $s$ .

Si l'on écrit :

Chaleur de solution  $\Theta$  = Énergie de fragmentation de  $D$  à  $d$  + chaleur de solution  $\theta$ , on en déduit la constante de RITTINGER :

$$C = 2670 \text{ cm}^2/\text{kgcm}$$

b) La constante de RITTINGER dépend des conditions de la fragmentation : type d'appareil, conditions de marche, etc.

Pour un même appareil, la constante de RITTINGER dépend en particulier de la vitesse des surfaces broyantes.

Nous la supposons indépendante des dimensions des fragments. On a donc :  $T = \frac{S}{C}$ .

( $C$  dépendant du mode de fragmentation.)

On peut admettre que la « machine à poids » donne la valeur maximum de la constante de RITTINGER :  $C_0$ .

### 4° RENDEMENT DE LA FRAGMENTATION

#### a) Rendement théorique.

94. — C'est le rapport

$$(1) \quad W_t = \frac{T_u}{T}$$

$T_u$  = travail utile : c'est-à-dire utilisé pour produire des surfaces nouvelles.

$T$  = travail total dépensé pour la fragmentation.

Ce rendement est  $< 1$  parce que le travail total  $T$  comprend :

Le travail utile  $T_u$ ;

Le travail nécessaire pour vaincre les frottements mécaniques de l'appareil;

[Par exemple, les divers paliers d'un appareil à mâchoires (bielle, volets, etc.) absorbent environ 65 % du travail total s'ils ne sont pas montés sur rouleaux.]

Le travail qui produit des déformations élastiques sans produire de surface nouvelle;

Le travail nécessaire pour vaincre l'inertie de la machine au départ (éventuellement).

Ces phénomènes ont pour conséquence la production de vibrations et surtout de chaleur.

Nous avons admis que la « machine à poids » donne la valeur maxima de la constante de RITTINGER, c'est-à-dire que son rendement théorique est 1. Le travail  $T_u$  se déduit donc de la constante de RITTINGER  $C_0$  et de la surface produite  $S$  :

$$(2) \quad T_u = \frac{S}{C_0}$$

$C_0$  et  $S$  se calculent elles-mêmes par les méthodes exposées au chapitre I (§ 3).

[Pour le quartz, on peut calculer exactement  $T_u$  puisqu'on peut mesurer  $S$  par dissolution et prendre  $C_0 = 17,6 \text{ cm}^2/\text{kgcm}$ .

On peut aussi mesurer les vitesses initiales de dissolution :

$v_0$  de l'échantillon initial;

$V'_0$  de l'échantillon après un travail  $T'$  dans la « machine à poids »;

$V_0$  de l'échantillon après la fragmentation dans l'appareil étudié.

On a :

$$T' = k(V'_0 - v_0)$$

$$T_u = k(V_0 - v_0).$$

D'où :

$$T_u = T' \frac{V_0 - v_0}{V'_0 - v_0}$$

Pour la magnétite, on n'a pas besoin non plus de connaître  $S$  et  $C_0$ . Il suffit de mesurer les forces coercitives :

$F_0$  de l'échantillon initial;

$F'$  de l'échantillon après un travail  $T'$  dans la « machine à poids »

$F$  de l'échantillon après la fragmentation dans l'appareil à étudier.

On a :

$$\begin{aligned} T' &= M(F' - F_0) \\ T_u &= M(F - F_0) \end{aligned}$$

D'où :

$$T_u = T' \frac{F - F_0}{F' - F_0}$$

Le travail  $T$  peut être mesuré avec précision, par exemple avec un intégrateur différentiel du couple moteur qui l'enregistre automatiquement.

### b) Rendement pratique (ou commercial).

95. — La fragmentation s'accompagne toujours d'un excès de particules fines : par exemple, si l'on concasse des pierres, on obtient des « farines » qui sont généralement perdues; si l'on broie des minerais, il est inutile ou même nuisible de descendre au-dessous d'une certaine dimension (environ 0,04 mm) pour envoyer les produits à la flottation.

C'est pourquoi l'on définit le rendement pratique :

$$W_p = \frac{T_p}{T}$$

$T_p$  = travail qui est pratiquement utilisé pour produire des surfaces nouvelles. Par exemple, si l'on concasse une roche en vue d'obtenir du gravillon 10/15 mm et si

$T_p$  = travail qui a servi à produire les surfaces nouvelles du gravillon 10/15 obtenu;

$T_u$  = travail utile (utilisé pour produire toutes les surfaces nouvelles);

$T_r$  = travail qui a servi à produire les surfaces nouvelles des sables et farines de rebut;

on a :

$$T_p = T_u - T_r$$

On peut écrire :

$$W_p = \frac{T_p}{T_u} \times \frac{T_u}{T} = \frac{T_p}{T_u} \times W_t \text{ [d'après (1)]}$$

Exemple : Une série d'essais effectués par GROSS sur du quartz dans un broyeur à boulets a donné les résultats suivants :

$$C = 2,6 \text{ à } 7,2 \text{ cm}^2/\text{kgcm} \text{ (36,1 à 99,9 cm}^2/\text{livre-pied)}$$

D'où :

$$W_t = \frac{2,6}{17,6} \text{ à } \frac{7,2}{17,6} = 0,15 \text{ à } 0,41$$

Si l'on prend pour dimension limite 0,04 mm, on trouve :

$$\frac{T_p}{T_u} \neq 0,16$$

D'où :

$$W_p = 0,024 \text{ à } 0,066$$

### c) Amélioration du rendement pratique.

1. — SUPPRESSION DES SURBROYAGES : Pour enlever les fragments qui n'ont plus besoin d'être broyés, il existe plusieurs procédés :

Tamis classeurs entre les étages d'appareils.

Grilles ou séparateurs à air destinés à évacuer les fragments dès qu'ils ont atteint la dimension désirée (appareils à boulets, appareils à marteaux, appareils à meules).

Lavage destiné à entraîner les produits broyés. Il fait penser au rôle physique de la salive dans le broyage buccal (ce lavage empêche aussi les poussières de se répandre dans l'atmosphère). Après de multiples essais effectués sur des appareils à boulets broyant du minerai GROSS déclare que l'efficacité maxima est obtenue pour un mélange de minerai et d'eau en parties égales en volume; l'eau a donc aussi un rôle d'agglomérateur. Elle améliore considérablement le rendement théorique (et réduit la chaleur dégagée pendant le broyage).

2. — UTILISATION DES APPAREILS A PLEINE CHARGE. Les appareils à marche continue doivent être pourvus d'un distributeur qui assure leur remplissage régulier.

Pour les appareils à mâchoires et les appareils giratoires, le remplissage devant être assuré tout le long des surfaces broyantes, les appareils doivent être à volume constant (n° 54).

Pour les appareils à boulets, la vitesse et le taux de remplissage doivent donner le travail maximum pour le même nombre de tours du moteur (n° 78 et 82).

## 5° RELATION ENTRE LE TRAVAIL DE FRAGMENTATION ET LA DIMENSION DES FRAGMENTS

### a) Fragments théoriques sphériques de même diamètre.

96. — Soient :

$D$  le diamètre des fragments initiaux,  
 $d$  — — — — — après la fragmentation,  
 $\delta$  la densité de la roche.

$$\text{Surface d'un fragment initial} = \pi D^2$$

$$\text{Volume} \quad \quad \quad = \frac{\pi D^3}{6}$$

Surface spécifique des fragments initiaux (surface de l'unité de poids) :

$$S = \frac{\pi D^2}{\frac{\pi D^3}{6} \delta} = \frac{6}{D\delta}$$

Surface spécifique après la fragmentation :

$$s = \frac{6}{d\delta}$$

Surface spécifique nouvelle :

$$s - S = \frac{6}{\delta} \left( \frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right)$$

Travail nécessaire pour produire cette surface spécifique théorique nouvelle.

$$(3) \quad T = \frac{6}{C\delta} \left( \frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right) \\ = K \left( \frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right)$$

(Cette formule n'a qu'une valeur théorique puisque les fragments broyés ne sont jamais sphériques.)

b) Fragments réels de dimension unique.

97. — Nous avons vu (n° 19) que pour le quartz le rapport  $R = \frac{\text{Surface réelle}}{\text{Surface théorique}}$  est une fonction statistiquement définie de la dimension  $d$ . Nous supposons qu'il en est de même pour les matériaux envisagés et que la fonction  $R$  est indépendante des conditions de la fragmentation en particulier pour les matériaux qui viennent de la carrière ou de la mine et qui ont déjà été fragmentés (par explosif, marteaux-piqueurs, etc.)

$$\text{Surface spécifique nouvelle} = \frac{6}{\delta} \left( \frac{R_d}{d} - \frac{R_D}{D} \right)$$

Travail nécessaire pour produire cette surface spécifique réelle nouvelle :

$$(4) \quad T = \frac{6}{C\delta} \left( \frac{R_d}{d} - \frac{R_D}{D} \right)$$

c) Fragments réels de granulométrie quelconque.

98. — Soit (M) la courbe granulométrique du matériau initial (de poids unité), d'équation  $y = F(x)$  (entre 0 et D) (fig. 82).

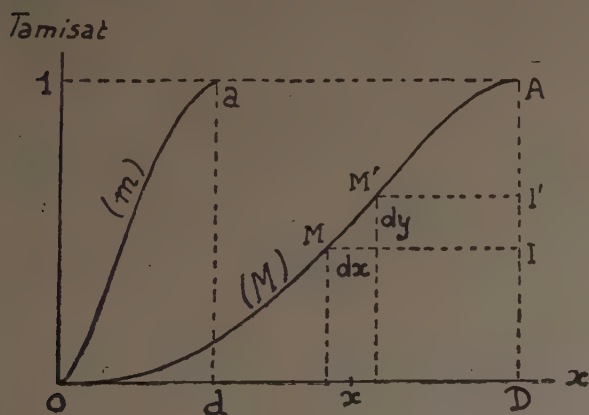


FIG. 82.

Calculons tout d'abord le travail nécessaire pour fragmenter un matériau initial de dimension unique D (c'est-à-dire ayant pour courbe granulométrique la parallèle DA à l'axe Oy) en un matériau de courbe granulométrique (M). Soient MM' les points de la courbe (M) d'abscisses respectives  $x - \frac{dx}{2}$  et  $x + \frac{dx}{2}$  et II' les points d'abscisse D et d'ordonnées correspondantes.

D'après la formule (4) le travail nécessaire pour passer de II' à MM' est

$$dT = \frac{6}{C\delta} dy \left( \frac{R_x}{x} - \frac{R_D}{D} \right)$$

Le travail nécessaire pour passer de DA à (M) est donc :

$$T_1 = \frac{6}{C\delta} \left[ \int_0^D \frac{F'(x) R_x}{x} dx - \frac{R_D}{D} \right]$$

De même, le travail nécessaire pour passer de DA à (m) [d'équation  $y = f(x)$ ] est :

$$T_2 = \frac{6}{C\delta} \left[ \int_0^D \frac{f'(x) R_x}{x} dx - \frac{R_D}{D} \right]$$

Par conséquent le travail nécessaire pour passer de la granulométrie (M) à la granulométrie (m) est :

$$(5) \quad T = T_2 - T_1 \\ = \frac{6}{C\delta} \int_0^D [f'(x) - F'(x)] \frac{R_x}{x} dx$$

d) Importance des particules fines.

99. — D'après la formule (4), pour la « machine à poids » broyant du quartz, on a :

$$T \text{ (kgcm)} = \frac{6}{17,6 \times 2,65} \left( \frac{R_d}{d} - \frac{R_D}{D} \right) \\ = 0,1286 \left( \frac{R_d}{d} - \frac{R_D}{D} \right)$$

Quand  $d \rightarrow 0$ ,  $T \rightarrow \infty$  (voir fig. 86).

Le travail utile absorbé par la fragmentation est donc d'autant plus considérable que les particules sont plus fines.

e) Graphiques de Gates.

100. — GATES considère la formule (3) comme exacte,

$$T = K \left( \frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right)$$

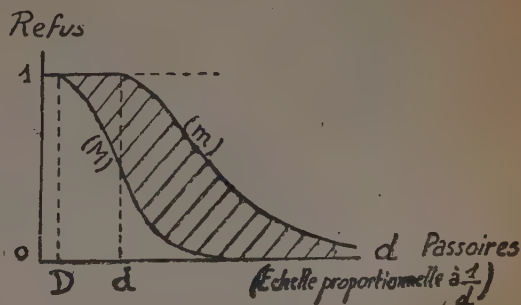


FIG. 83.

Traçons les courbes granulométriques en portant en abscisse non pas  $d$  mais  $\frac{1}{d}$  (avec les anciens tamis dont le numéro d'ordre désignait le nombre de mailles par pouce, on pouvait porter des abscisses proportionnelles aux numéros des tamis) (fig. 83).

On voit que le travail de fragmentation est proportionnel à l'aire hachurée.

Remarques : 1. La formule (3) ne tient pas compte de la fonction  $R$ . Or nous avons vu (n° 19) que pour les fragments de quartz compris entre 0 et 5,69 mm,  $R$  varie de 1,5 à 8,6, c'est-à-dire du simple au sextuple. Le graphique de GATES ne peut donc donner qu'une approximation du travail de fragmentation.

En réalité, ce sont des abscisses proportionnelles à  $\frac{Rd}{d}$  qu'il faudrait porter.

2. La partie la plus importante de l'aire de GATES est du côté des abscisses croissantes; et c'est la partie des courbes granulométriques la plus mal connue.

3. Le graphique de GATES suppose la constante de RITTINGER  $C$  fixe. Il ne peut donc servir qu'à comparer des appareils de même type travaillant dans les mêmes conditions et broyant des matériaux de même nature.

#### f) Formule de Del Mar.

Si l'on néglige  $\frac{1}{D}$  dans la formule (4), on a :

$$T = \frac{6}{C_0} \frac{R_d}{d}$$

Cette formule est d'autant plus précise que le taux de réduction est plus grand.

### 6° UTILISATION PRATIQUE DE LA LOI DE RITTINGER

#### 102. a) Calcul du rendement théorique.

$$W_t = \frac{S}{C_0 T} \text{ [d'après (1) et (2)]}$$

On mesure la surface spécifique nouvelle  $S$  par les méthodes indiquées au chapitre I (§ 3),  $C_0$  par les méthodes indiquées aux numéros 41 et 42.

$T$  est le travail moteur fourni à l'appareil de fragmentation par unité de poids de matériau.

#### b) Calcul du rendement pratique.

Soient  $(M)$  et  $(m)$  les courbes granulométriques respectives des matériaux initial et final, et  $d_1$  la dimension inférieure limite du produit commercial.

On assimile :

la courbe  $(M)$  à une droite  $D_1A$  (fig. 84);  
la courbe  $(m)$  à une ligne brisée  $PQ...B$  (de  $d_1$  à  $d$ ).

Tamisé

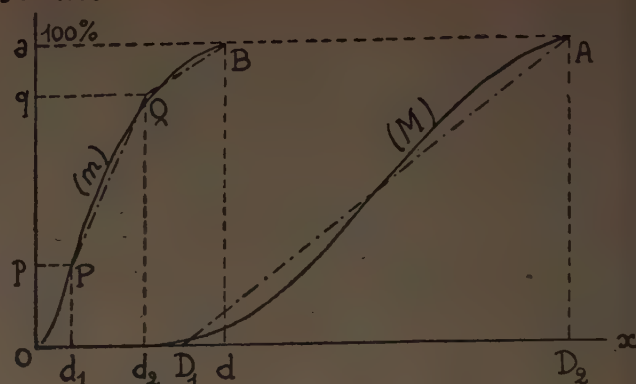


FIG. 84.

Nous avons vu (n° 21) que la dimension moyenne applicable pour le calcul de la surface des fragments est pour le matériau initial :

$$D_m = \frac{D_2 - D_1}{\log_e \frac{D_2}{D_1}} = \frac{D_2 - D_1}{2,3026 \log_{10} \frac{D_2}{D_1}}$$

De même pour la courbe  $PQ$  :

$$d_m = \frac{d_2 - d_1}{\log_e \frac{d_2}{d_1}}$$

[Ce sont ces dimensions moyennes qu'il faut prendre pour les calculs de travail de fragmentation (puisque celui-ci n'est fonction que des surfaces nouvelles) si l'on considère

$$R = \frac{\text{surface réelle}}{\text{surface théorique}}$$

comme un invariant pour toute la catégorie envisagée.]

Travail spécifique :

$$T_p = \frac{6}{C_0} \left( \frac{R_{dm}}{d_m} - \frac{R_{Dm}}{D_m} \right) \times \frac{pq}{Oa}$$

Travail spécifique total :

$$T = \frac{\text{travail total dépensé dans l'appareil pendant un temps } t}{\text{poids de matériau traité pendant le même temps}}$$

D'où

$$W_p = \frac{T_p}{T}$$

#### c) Calcul du travail nécessaire pour obtenir une surface spécifique donnée.

C'est le problème qui se pose par exemple pour le broyage du ciment.

On a :

$$W_t = \frac{S}{C_0 T} \text{ [d'après (1) et (2)]}$$

D'où

$$T = \frac{S}{C_0 W_t}$$

S est donné.

On calcule  $C_0$  et  $W_t$  comme il est dit ci-dessus.

#### d) Comparaison des rendements des appareils.

Suivant qu'on cherche à obtenir un matériau de dimension donnée ou un matériau de surface spécifique donnée, on compare les  $W_p$  ou les  $W_t$ .

### B. — LOI DE KICK

103. — *Le travail nécessaire pour produire des changements de configuration analogues dans des corps géométriquement semblables et de matière uniforme varie comme les volumes (ou les poids) de ces corps.*

#### 1<sup>o</sup> Démonstration.

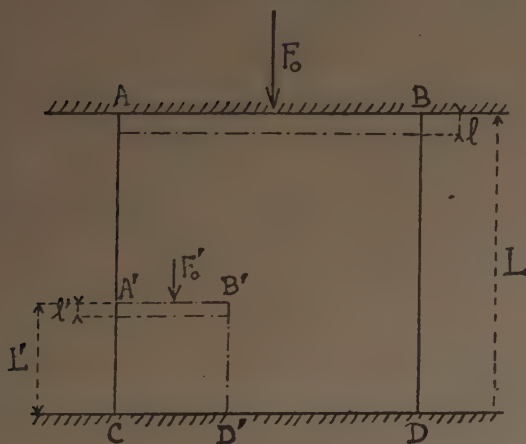


FIG. 85.

Soit un cube ABCD, d'arête L, comprimé entre les deux plateaux d'une presse avec une force F uniformément répartie et appliquée progressivement (fig. 85). Considérons un cube A'B'C'D' d'arête L', faisant partie du cube ABCD; la force F' qui le comprime est telle qu'on a constamment :

$$\frac{F}{F'} = \frac{L^3}{L'^3}$$

Si l et l' sont les raccourcissements respectifs des arêtes AC et A'C, on a :

$$\frac{l}{l'} = \frac{L}{L'}$$

Supposons que la force croisse linéairement en fonction

du temps et qu'elle atteigne la valeur  $F_0$  au temps 1 :

$$F = F_0 t$$

Tant que la loi de HOOKE est applicable, un accroissement  $\Delta F$  entraîne un accroissement  $\Delta l$  tel que :

$$\frac{\Delta l}{L} = \frac{\Delta F}{E} = \frac{F_0 \Delta t}{E}$$

(E étant le module d'élasticité.)

Le travail de la force F, croissant de 0 à  $F_0$  est

$$T = \int_0^1 F \Delta l = \int_0^1 F_0 t \frac{L F_0 \Delta t}{E} = F_0 \times \frac{F_0 L}{E} \times \left[ \frac{t^2}{2} \right]_0^1$$

ou

$$T = \frac{F_0^2 L}{2}$$

(c'est le potentiel interne du solide déformé).

On a de même :

$$T' = \frac{F_0'^2 L'}{2}$$

D'où

$$\frac{T}{T'} = \frac{F_0^2}{F_0'^2} \times \frac{L}{L'} = \frac{L^3}{L'^3} \text{ (c. q. f. d.)}$$

Pour appliquer la loi de KICK à la fragmentation il y a un pas que de nombreux techniciens ont franchi à la suite de KICK. Ils ont émis l'hypothèse que les ruptures de deux fragments semblables surviendraient pour des raccourcissements semblables et seraient elles-mêmes semblables. Nous avons vu qu'il n'en est rien (n<sup>o</sup> 19).

Cependant nous allons voir que la loi de KICK peut rendre des services dans certains cas.

#### 2<sup>o</sup> Application à la fragmentation.

104. — Soit t le travail de fragmentation d'une roche de dimension D à un taux de réduction r (> 1).

Nous supposons que tous les fragments ont la même forme, du moins statistiquement, c'est-à-dire que le volume d'un fragment  $v = kD^3$  (k étant une constante).

Le travail de fragmentation d'un volume unité de matériaux au taux r est :  $\frac{t}{kD^3}$

D'après la loi de KICK, le travail de fragmentation d'un fragment de dimension  $\frac{D}{r}$  au taux r est :  $\frac{t}{r^3}$

Le travail de fragmentation d'un volume unité de matériaux de dimension  $\frac{D}{r}$  au taux r est :

$$\frac{t}{r^3} \times \frac{1}{k \left( \frac{D}{r} \right)^3} = \frac{t}{kD^3}$$

On voit de même que le travail de fragmentation d'un volume unité de matériaux de dimension  $\frac{D}{r^p}$  au taux  $r$  est :  $\frac{t}{kD^3}$

Pour fragmenter un matériau au taux  $r' = r^n$ , on peut le fragmenter  $n$  fois au taux  $r$  successivement. Le travail de cette fragmentation pour un volume unité de matériaux est donc :

$$T = \frac{nt}{kD^3} = Kn$$

$$= K \log_r r'$$

Le taux  $r$  ayant été choisi arbitrairement, on peut écrire :

$$(6) \quad T = K \log_{10} \frac{D}{d}$$

$$= K \log_{10} D - K \log_{10} d$$

### 3<sup>o</sup> Justification.

105. — Nous avons vu (n<sup>o</sup> 99) que le travail de fragmentation du quartz dans la « machine à poids » est

$$T = 0,1286 \left( \frac{R_d}{d} - \frac{R_D}{D} \right)$$

En utilisant les valeurs de  $R_d$  données au n<sup>o</sup> 19, on peut tracer la courbe représentative de la fonction  $0,1286 \frac{R_d}{d}$

Mais si l'on trace cette courbe en portant des abscisses proportionnelles à  $\log_{10} d$ , on voit que sa courbure est

faible (fig. 86). On peut donc l'assimiler à une droite sur une assez grande longueur, ce qui revient à prendre  $T = K (\log_{10} D - \log_{10} d)$ .

C'est bien l'expression (6) de la loi de KICK.

Par exemple, si l'on utilise la loi de KICK entre 0,569 et 0,0503 cm, c'est-à-dire pour un taux de réduction de 11, on obtient le tableau suivant :

$d$ (cm)	0,569	0,4103	0,2845	0,2007	0,1410	0,1001	0,0711	0,0503
$K = \frac{T}{\log \frac{D}{d}}$ (kgcm)		3,52	3,39	3,18	3,55	4,15	4,62	5,70

La moyenne de  $K$  est 4,01.

Son écart probable est 0,69, soit 17 % de  $K$ .

La précision est donc largement suffisante en général pour la pratique.

Il découle de l'exposé qui précède que pour la fragmentation d'une roche à peu près homogène, la loi de KICK est suffisamment approchée pour un taux de réduction limité (ne dépassant pas 12 par exemple). D'aucuns ont prétendu que la loi de RITTINGER est applicable au-dessous de 2 mm; et que la loi de KICK est applicable au-dessus de 63 mm. Mais on ne voit pas très bien pourquoi des fragments n'obéiraient pas à la même loi suivant qu'ils contiennent plus de  $10^{24}$  ou moins de  $10^{20}$  molécules cristallines. (Si la fonction  $R_d$  était une constante, la loi de KICK aurait toujours la même approximation pour un taux de réduction donné, quelle que soit la dimension des fragments.)

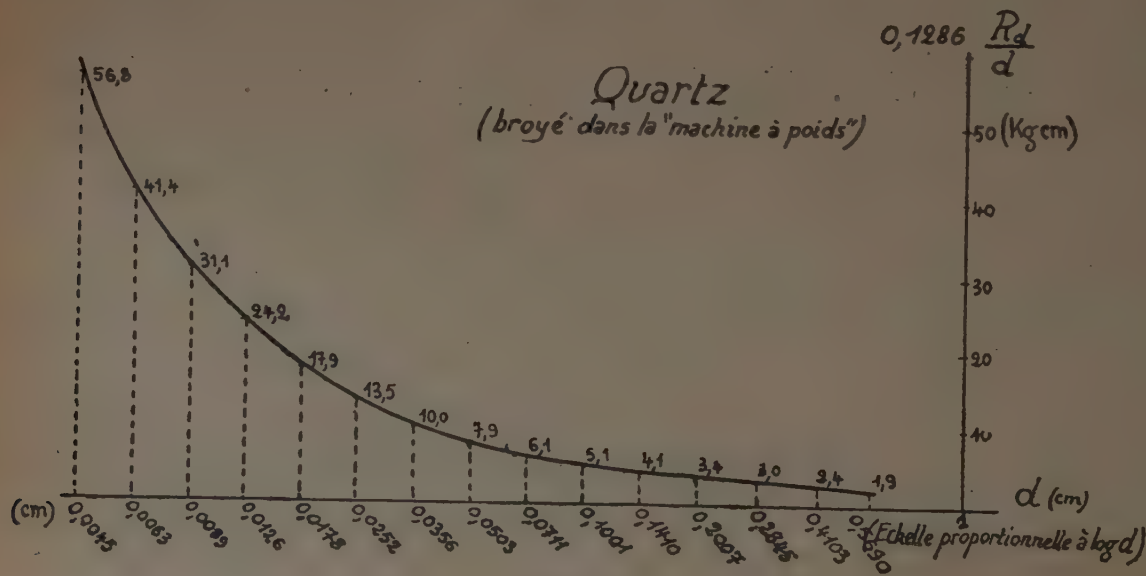


FIG. 86.

4<sup>e</sup> Utilisation pratique.

106. — Soient (M) et (m) les courbes granulométriques du matériau avant et après la fragmentation, ayant respectivement pour équations  $F(x)$  et  $f(x)$ . Supposons que ces courbes aient la même forme générale, c'est-à-dire que :

$$f(x) \equiv F\left(\frac{x}{d}\right)$$

(c'est une hypothèse assez voisine de la réalité en général) (fig. 87).

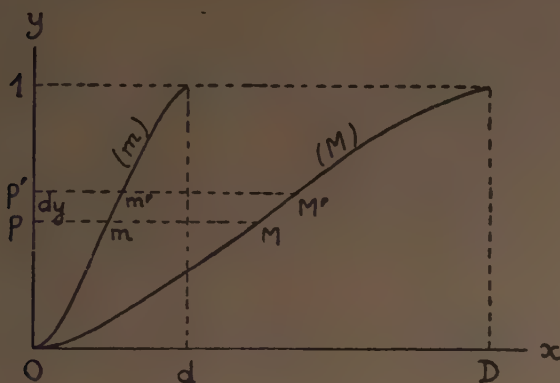


FIG. 87.

A tous les points M de (M) correspondant des points de même ordonnée m de (m) tels que :

$$\frac{pm}{pM} = \frac{d}{D}$$

On peut supposer que c'est le matériau correspondant au segment MM' qui se fragmente pour donner le matériau correspondant au segment mm', exigeant un travail de fragmentation :

$$dT = K dy \log \frac{D}{d}$$

D'où :

$$T = K \log \frac{D}{d}$$

Il suffit de calculer K pour une fragmentation déterminée. Pour cela on mesure le travail fourni à l'appareil de fragmentation par unité de poids de matériau, et l'on prend pour D et d les « dimensions » respectives des matériaux avant et après la fragmentation.

Remarque : Si les deux courbes granulométriques (M) et (m) ne sont pas analogues, il existe un graphique permettant d'utiliser la loi de KICK. Il est analogue au graphique de GATES (n° 100), mais il est obtenu en portant les abscisses proportionnelles à  $\log d$ , les ordonnées proportionnelles aux refus correspondant à d.

C. — LOIS EMPIRIQUES

1<sup>o</sup> Loi des tangentes de M. Dejean.

107. — La pente de la tangente à l'origine d'une courbe de débit granulométrique est proportionnelle à la puissance nécessitée par l'opération.

(La courbe de débit granulométrique se déduit de la courbe granulométrique en multipliant les ordonnées de celle-ci par le débit.)

Le coefficient de proportionnalité de la loi des tangentes dépend de la roche, et des conditions de la fragmentation.

Nous avons vu que la formule donnant le travail de fragmentation :

$$(5) \quad T = \frac{6}{C\delta} \int_0^D [f'(x) - F'(x)] \frac{R_x}{x} dx$$

est une conséquence de la loi de RITTINGER (n° 98).

Il en résulte que la tangente à l'origine de la courbe granulométrique est l'axe des abscisses :

En effet, puisqu'on a toujours  $R_x > 1$  (n° 19), on peut écrire :

$$T > \frac{6}{C\delta} \int_0^D \frac{f'(x) - F'(x)}{x} dx$$

Posons :

$$f(x) - F(x) \equiv a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \dots (\text{développement en série}).$$

$$f'(x) - F'(x) \equiv a_1 + 2a_2 x + 3a_3 x^2 + \dots$$

D'où

$$T > \frac{6}{C\delta} \int_0^D \left( \frac{a_1}{x} + 2a_2 + 3a_3 x + \dots \right) dx = \frac{6}{C\delta} \left( a_1 \log_e \frac{D}{0} + 2a_2 D + \dots \right)$$

Pour que T ait une valeur finie, il faut que  $a_1 = 0$ .

Par conséquent :

$$\frac{f(x) - F(x)}{x} = a_2 x + a_3 x^2 + \dots \rightarrow 0 \text{ avec } x.$$

Les courbes granulométriques initiale et finale ont donc même tangente à l'origine. Il en est de même pour toutes les opérations de fragmentation. Ces courbes ont donc en particulier même tangente à l'origine que la courbe granulométrique de la roche avant son extraction. Cette tangente ne peut donc être que l'axe des abscisses.

La « loi des tangentes » est donc en contradiction avec la loi de Rittinger. Cependant on peut dire paradoxalement qu'elle découle de la loi de RITTINGER en ce sens qu'elle revient en réalité à considérer que les particules fines

(c'est-à-dire au-dessous d'une dimension donnée) absorbent tout le travail de fragmentation. Elle se justifie par l'importance des particules fines pour ce travail.

Il suffit donc pour utiliser pratiquement la « loi des tangentes » de remplacer dans son énoncé « tangente à l'origine » par « corde joignant l'origine à un point de la courbe de débit granulométrique d'ordonnée facilement mesurable et d'abscisse fixe, le plus près possible de l'origine ».

2° De nombreuses formules empiriques ont été proposées pour mesurer le travail de fragmentation.

Par exemple pour l'appareil à cylindres

$$T = K \left( \frac{D}{d} - \frac{d}{D} \right)$$

Des graphiques expérimentaux permettent aussi de calculer ce travail.

## II. — PROCESSUS DE LA FRAGMENTATION DES ROCHES EN COMPRESSION

### A. — OBSERVATION DES RUPTURES

#### 108. 1° CUBE PRESSÉ ENTRE LES PLATEAUX D'UNE PRESSE

Des plans de rupture s'amorcent généralement suivant les arêtes en contact avec les plateaux (fig. 88).

Pour les roches dures les surfaces de rupture sont peu inclinées sur la verticale.

#### 2° POINÇONNAGE

##### 109. — a) Poinçonnage par un petit parallélépipède d'acier.

Il se forme un petit prisme de roche, plus ou moins pulvérisé, dont une face est en contact avec le parallélépipède (fig. 89) (rupture rappelant celle du n° 108), et une surface de rupture s'amorçant à l'arête inférieure de ce prisme.

##### 110. b) Poinçonnage double.

Il se forme deux prismes de roche; un plan de rupture joint les arêtes libres de ces deux prismes (fig. 90).

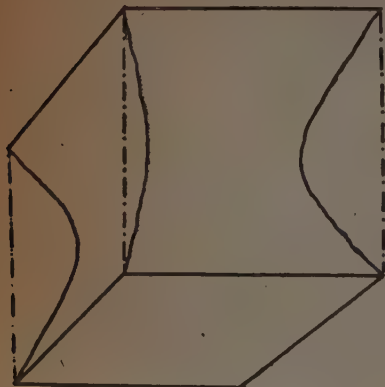


FIG. 88.

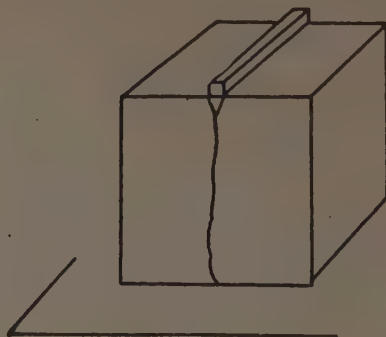


FIG. 89.

##### 111. c) Poinçonnage par un petit cube d'acier (fig. 91).

Rupture analogue à celle du n° 109.



FIG. 90.

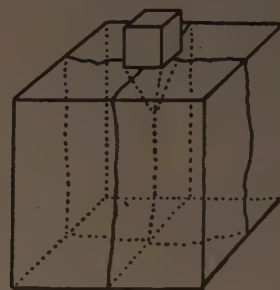


FIG. 91.

##### 112. 3° ELLIPSOÏDE, SPHÈRE

On sait que pour un effort de compression donné (pour des corps parfaitement élastiques) le contact d'un pla-

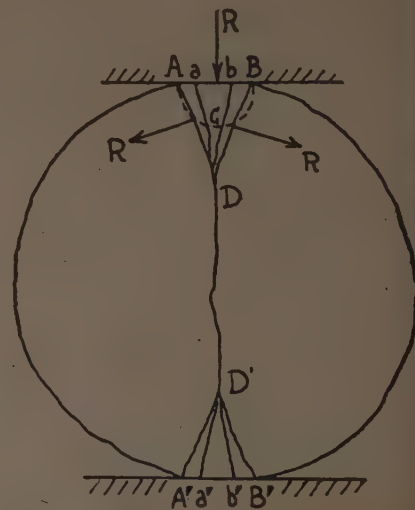


FIG. 92.

teau poli et de l'ellipsoïde (ou plus généralement d'un solide quelconque) a la forme d'une petite ellipse AB (fig. 92), sur laquelle les vecteurs représentant les pressions sont limités à un petit ellipsoïde ACB. S'il y a frottement, ces pressions se dirigent vers l'axe de l'éprouvette.

Des ruptures se produisent suivant des cônes Dab (et D'a'b'). Des petits cônes DAB et D'A'B' sont pulvérisés et se comportent un peu comme un liquide, transmettant la pression R aux surfaces latérales. Il en résulte dans la zone centrale DD' des efforts de traction qui cassent la roche généralement en deux morceaux principaux, quelquefois en trois ou quatre. On pourrait presque parler de poinçonnage (n° 111). (La glace se casse d'une manière analogue quand on y enfonce un poinçon.)

### 113. 4° PRISME TRIANGULAIRE POSÉ SUR UNE FACE LATÉRALE

Un petit prisme ADE (fig. 93) est pulvérisé.

La pression s'exerce ainsi sur un plan DE. Le prisme DEF est pulvérisé aussi (comme dans le cas du n° 112) et il se forme des surfaces de rupture FGH (ou quelquefois FCI et FCJ).

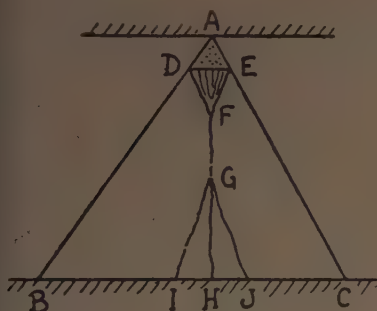


FIG. 93.



FIG. 94.

### 114. 5° CUBE OU PARALLÉLÉPIPÈDE, COMPRIMÉ SUR DEUX ARÊTES (fig. 94).

La rupture est analogue à celle des n°s 110, 112 et 113.

## B. — PRINCIPES GÉNÉRAUX DE LA FRAGMENTATION

115. — 1° Les fragments subissent de nombreuses pressions pendant toute la fragmentation, si bien qu'ils présentent de multiples surfaces internes (n° 17) qui sont des amorces de rupture.

116. — 2° Les corps broyés ne touchent initialement les corps broyants (surfaces broyantes proprement dites ou fragments voisins) que par des points.

Il existe presque toujours quatre points de contact principaux : En effet, un corps en équilibre sur une surface  $S_1$  la touche en trois points ABC. Pour la comprimer par une autre surface  $S_2$ , il faut ajouter un quatrième contact D. [Il peut arriver aussi qu'il y ait deux points de contact avec  $S_1$  et deux avec  $S_2$ . Exceptionnellement il peut y avoir deux points de contact avec  $S_1$  et un avec  $S_2$ ; ou même un avec  $S_1$  et un avec  $S_2$ ].

117. — 3° Il existe toujours un certain frottement entre les corps broyés et les corps broyants. Ce frottement dépend principalement de la nature de la roche et de son humidité.

118. — 4° La rupture d'un fragment ne peut se produire que si les contacts aux quatre points ABCD ont atteint une certaine surface. Il en résulte des petits cônes pulvérisés dont les pointes constituent des amorces de rupture. Ces cônes ont une aire de base d'autant plus grande que la roche est plus poreuse et que les courbures moyennes du corps broyant et du corps broyé aux points de contact sont plus voisines. Ils sont d'autant plus pointus (autrement dit leur hauteur est d'autant plus grande pour la même aire de base), que la roche est plus dure.

119. — 5° Le mouvement de la surface broyante  $S_1$  n'est généralement pas perpendiculaire à la seconde surface  $S_2$  (sauf en principe pour les pilons).

120. — 6° La rupture passe généralement par le point de contact D. Elle coupe le triangle des trois autres points de contact principaux ABC. En particulier elle passe souvent par un ou plusieurs des points ABC.

## III. — GRANULOMÉTRIE DES MATÉRIAUX FRAGMENTÉS

### A. — COURBE GRANULOMÉTRIQUE

121. — La courbe granulométrique d'un matériau (0/d) passe par les points O (0, 0) et A (d, 100 %). La courbe la plus simple serait la droite OA (fig. 95) mais les considérations théoriques imaginées pour le prouver ne sont généralement que des spéculations qui pourraient être

remplacées par la simple assimilation d'une courbe à sa corde. C'est ce que nous avons fait lors du calcul de la dimension moyenne d'une catégorie comprise entre deux dimensions voisines d'un ensemble de fragments (n° 21). Mais entre les dimensions extrêmes 0 et d cette assimilation ne peut généralement être qu'une approximation assez grossière. On ne voit d'ailleurs pas pourquoi *a priori* les tamisats varieraient linéairement en fonction de

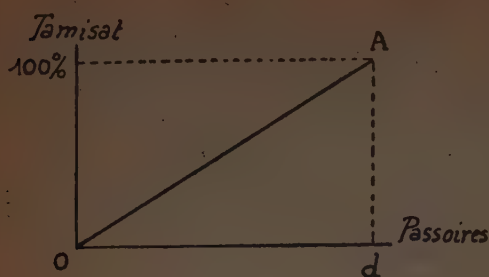


FIG. 95.

l'abscisse  $d$  plutôt qu'en fonction de  $s = d^2$  ou  $v = d^3$  par exemple.

Les raisonnements qui permettent de déterminer théoriquement l'équation de la courbe granulométrique ne peuvent être qu'artificiels, et de nombreuses fonctions ont été proposées. Nous n'en citerons qu'une, découlant d'études systématiques sur le quartz faites par GAUDIN aux États-Unis :

## B. — LOI DE L'INTÉRÊT COMPOSÉ

(roche structuralement homogène)

122. — Si pour du quartz broyé on trace la courbe de fréquence du nombre des fragments en fonction de la dimension (les abscisses étant séparées par des intervalles en progression arithmétique) on trouve une courbe (F) concave vers les ordonnées (fig. 96), qui suggère l'équation d'une courbe :

$$y = \frac{dN}{dx} = ae^{-bx} \quad (e = 2,7183)$$

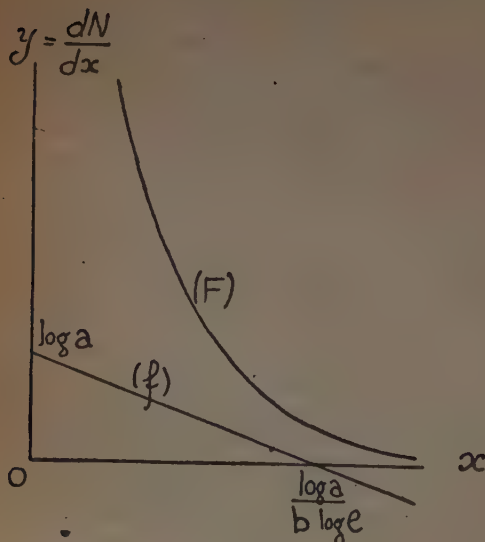


FIG. 96.

Effectivement, si l'on porte  $\log y$  en ordonnée, au lieu de  $y$ , on trouve une droite (f) :

$$\log y = \log a - bx \log e$$

Il suffit donc de déterminer deux points de la droite (f) pour calculer  $a$  et  $b$ .

On a appelé cette relation *loi de l'intérêt composé* par analogie avec la formule.

$$S = S_0(1 + i)^t$$

où :

$S_0$  = somme initiale;

$i$  = intérêt annuel;

$t$  = temps en années.

Elle rappelle aussi la loi barométrique donnant la pression atmosphérique en fonction de l'altitude :

$$p = p_0 e^{-bh}$$

1° Nombre des fragments de  $d_1$  à  $d_2$

$$N_{d_1}^{d_2} = \int_{d_1}^{d_2} y dx = \frac{1}{b} (y_1 - y_2)$$

Nombre total des fragments :

$$N = \int_0^{\infty} y dx = \frac{a}{b}$$

2° Pour des intervalles en progression arithmétique

$$d_1 - d_2 = d_2 - d_3 = K$$

$$\frac{y_1}{y_2} = \frac{y_2}{y_3} = e^{-bk} = C^{te}$$

$$\frac{N_{d_1}^{d_2}}{N_{d_2}^{d_3}} = \frac{y_1 - y_2}{y_2 - y_3} = e^{-bk} = C^{te}$$

Par conséquent, si  $x$  en progression arithmétique,

$N_{d_1}^{d_2}$  en progression géométrique.

$$3^\circ \quad y' = \frac{dy}{dx} = -abe^{-bx} = -by$$

$$D'où \quad y' = -b^2 N_d^{cc}$$

Par conséquent, la dérivée de la courbe de fréquence, c'est-à-dire l'accroissement du nombre des fragments en fonction de leur dimension est proportionnel au nombre de fragments supérieurs à cette dimension.

4° Courbe granulométrique.

Le nombre des fragments compris entre  $x$  et  $x + dx$  est :

$$dN = ae^{-bx} dx$$

Si l'on suppose que le volume d'un fragment est  $x^3$ , le volume de l'ensemble des fragments compris entre  $x$  et  $x + dx$  est :

$$dV = ax^3e^{-bx} dx$$

D'où :

$$V_0^x = \int_0^x ax^3e^{-bx} dx$$

En intégrant par parties [ou en posant

$$V_0^x = e^{-bx}(\alpha x^3 + \beta x^2 + \gamma x + \delta) + \varepsilon$$

et en calculant les coefficients  $\alpha\beta\gamma\delta\varepsilon$ ] on trouve :

$$V_0^x = -\frac{a}{b}e^{-bx}\left(x^3 + \frac{3x^2}{b} + \frac{6x}{b^2} + \frac{6}{b^3}\right) + \frac{6a}{b^4}$$

C'est l'équation de la courbe granulométrique, à un facteur près (fig. 97).

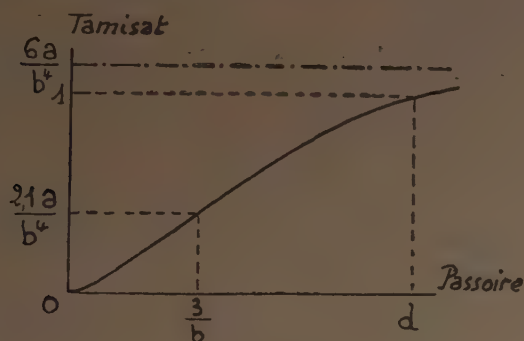


FIG. 97.

$$\frac{dV}{dx} = ax^3e^{-bx}$$

$$\frac{d^2V}{dx^2} = ax^2e^{-bx}(3 - bx)$$

Le point  $x = \frac{3}{b}$  est un point d'inflexion. C'est le point où la pente de la tangente à la courbe granulométrique est maxima, c'est-à-dire où la courbe de fréquence en volume passe par un maximum (c'est le « mode » de cette courbe de fréquence).

On obtient bien la forme générale de nombreuses courbes granulométriques expérimentales.

## C — VARIATION DE LA GRANULOMÉTRIE EN FONCTION DES PARAMÈTRES DE LA FRAGMENTATION.

123. — La fragmentation est d'autant meilleure qu'elle est plus sélective (ou qu'elle donne une courbe granulométrique plus verticale), c'est-à-dire en définitive qu'elle donne moins de fin.

En effet, d'une part il est toujours possible de recasser des fragments trop gros, alors qu'on peut difficilement agglomérer des fragments trop petits, d'autre part le travail de fragmentation est d'autant plus considérable que le produit obtenu est plus fin (n° 99).

### 1° Nature de la roche.

Nous avons vu que les dimensions des petits cônes pulvérisés dépendent des caractéristiques mécaniques de la roche (n° 118) et que le volume de ces cônes est d'autant plus grand d'une part que la roche est plus poreuse, d'autre part qu'elle est plus dure. Ces deux conditions sont souvent contradictoires. Ainsi s'explique que les avis des utilisateurs soient partagés. Cependant il semble qu'en général les roches donnent d'autant plus de fin qu'elles sont plus résistantes.

Une roche oolithique ou pisolithique ou granuleuse (n° 29) donne une courbe de fréquence présentant un maximum pour les grains correspondants.

### 2° Granulométrie initiale des matériaux à l'entrée de l'appareil.

124. — Elle a peu d'influence sur la courbe granulométrique du produit. En effet, dans la plupart des appareils les matériaux sont comprimés des dizaines de fois avant de sortir. On conçoit qu'ils aient eu le temps d'oublier leur granulométrie initiale et que ce soient les dernières compressions qui soient les plus importantes.

### 3° Surfaces broyantes.

125. — a) RÉGLAGE. — Pour rendre la courbe granulométrique plus sélective, il faut employer ce que nous appellerons un *réglage constant*, c'est-à-dire tel que l'écart des surfaces broyantes lors de la dernière compression des matériaux avant leur sortie soit constant. *Cela exige que l'angle de prise soit nul à la sortie.* [Exemples : appareil à mâchoires tangentes (n° 58), appareils à cylindres (n° 73)]. Tout au moins cet angle de prise doit être faible.

b) COURSE. — 1. Pour les appareils à mâchoires et les appareils giratoires dont l'angle de prise n'est pas nul à la fente, le réglage est d'autant plus constant que la course est plus faible.

2. Nous avons vu (n° 50) que la course ne peut pas dépasser les 60 % du réglage. Pour une telle valeur de la course, lors de la dernière compression, les matériaux en vrac auraient une porosité nulle. Il en résulterait un effort de compression très grand et partant une pulvérisation poussée. On conçoit donc que cette pulvérisation soit d'autant moindre que la course est plus faible.

Pour les appareils où la fragmentation a lieu en une seule compression (appareils à cylindres) la courbe granulométrique est d'autant plus sélective que le taux de réduction est plus faible, pour la même raison.

Pour les appareils à boulets, on recherche en général la finesse. Il faut donc prendre des boulets lourds. D'autre part, pour multiplier les points de contact, il faut que les boulets soient nombreux. Ces conditions sont contradictoires : il faut donc prendre finalement les boulets les plus petits possible capables d'écraser les matériaux par leur chute (n° 90).

c) PROFIL. — La fragmentation idéale consisterait à ne casser jamais que les plus gros fragments. (C'est la méthode du casseur de cailloux, qui étale une trentaine de pierres devant lui et qui casse toujours les plus grosses en deux avec un marteau jusqu'à ce que tous les fragments aient la dimension désirée.) Il faut donc qu'un fragment une fois cassé dans ce que nous avons appelé une tranche de matériaux (chapitre III) change de tranche. Autrement dit, il faut éviter que les fragments ne soient broyés les uns par les autres (autoconcassage).

Pour le ballast et le gravillon routiers, on pourrait dire que l'autoconcassage améliore la qualité des produits en éliminant les parties faibles de la roche, mais si ce raisonnement est en partie justifié, on peut dire aussi que l'autoconcassage élimine surtout les fragments les plus petits qui sont cassés par les plus gros, alors que le problème correctement posé est exactement l'inverse.

Pour que les fragments puissent descendre assez pour toucher les deux surfaces broyantes, il faut éviter le freinage des matériaux par les couches inférieures : c'est le principe des appareils à volume constant. On améliorerait même la granulométrie en utilisant des appareils à volume croissant, c'est-à-dire dont l'angle de prise serait faible à la sortie.

Si l'on a remarqué depuis longtemps que la courbe granulométrique est d'autant plus sélective que le taux de réduction est plus faible pour les appareils à mâchoires et les appareils giratoires, il est probable que la raison essentielle en est que l'on considérait des mâchoires planes ou des noix et des boisseaux coniques. Dans ce cas l'autoconcassage est d'autant plus important que le taux de réduction est plus grand :

En effet, prenons par exemple, le cas d'un appareil à mâchoires (n° 54, fig. 30). On augmente généralement le taux de réduction en réduisant le réglage.

Section de la « tranche » à la sortie :  $S_s \neq \frac{cr}{\theta}$

Section de la tranche à mi-hauteur du balancier :

$$S_m \neq \frac{c}{2\theta} \left( r + \frac{L\theta}{2} \right)$$

$$\text{D'où : } \frac{S_m}{S_s} = \frac{1}{2} + \frac{L\theta}{4r}$$

Le freinage de la descente des matériaux, d'autant plus important que  $\frac{S_m}{S_s}$  est plus grand, augmente donc quand le réglage  $r$  diminue.

De plus, si la course reste la même le rapport  $\frac{c}{r}$  augmente et nous avons vu (n° 125) qu'il en résulte une augmentation du pourcentage des éléments fins.

d) ONDULATION. — Nous avons vu que la rupture d'un fragment ne peut survenir qu'après la formation de petits cônes pulvérisés aux quatre « points principaux » ABCD (n° 118) et que ces cônes sont d'autant plus grands que les courbures moyennes des corps broyant et broyé aux points de contact sont plus voisines. Il en résulte que les dents des mâchoires rendent la courbe granulométrique un peu plus sélective. De plus, les fragments une fois cassés peuvent se dérober à la pression en glissant dans les intervalles. Tout se passe donc comme si les dents réduisaient la course.

Certaines dents sont limitées par des dièdres de 70 à 90°, mais l'usure les émousse assez vite. D'autres sont constituées par des lamelles d'acier au manganèse, comprimant les matériaux par leur tranche. Ainsi la surface de contact est à peu près constante quelle que soit l'usure (fig. 98).



Certains cylindres destinés à la fragmentation de matériaux tendres portent des nervures qui ont pour but d'augmenter le frottement et partant l'angle de prise.



FIG. 98.

#### 4° Angle de prise.

126. — Si l'angle de prise est trop grand, les fragments glissent, échappent à la pression, ils sautillent dans un appareil à cylindres de trop faible diamètre, ils s'esquivent dans un appareil à meules ou à boulets trop petits. Ils s'usent donc et s'arrondissent au lieu de se casser et donnent beaucoup de fin.

#### 5° Type d'appareil.

127. — a) APPAREILS A MACHOIRES. — Le Simplex donne plus de fin que le BLAKE, à cause de son mouvement de râpe (même phénomène que pour un angle de prise trop petit).

b) TUBE MILL. — La finesse du produit croît avec la longueur du tube.

c) APPAREILS A MARTEAUX. — Certains appareils ne comportent pas de grille. Dans ce cas la finesse du produit croît avec :

- La friabilité de la roche;
- La vitesse de rotation;
- Le nombre des marteaux et des parachocs.

#### 6° Organisation de l'installation.

Nous n'avons parlé jusqu'ici que de la granulométrie des matériaux après leur passage dans un seul appareil. Si la fragmentation s'opère en plusieurs étages la granu-

lométrie peut être améliorée en enlevant du circuit les matériaux qui ont atteint une dimension désirée, ou en leur faisant sauter un étage (classeurs, grilles, lavage).

Remarque : Dans les appareils à mâchoires à dents en lamelles, les petits fragments peuvent glisser entre les dents jusqu'à la fente sans être recassés.

#### IV. — FORMES DES FRAGMENTS

128. — La question de la forme des fragments se pose pour les « agrégats » du béton de construction et surtout pour le ballast et le gravillon routiers.

Le problème peut se résumer ainsi : *Quel est le procédé qui permet de casser les fragments perpendiculairement et au milieu de leur longueur ?*

A) Plus encore que pour la granulométrie, c'est évidemment la région voisine de la fente de l'appareil de fragmentation qui est capitale.

129. B) Dans cette région les fragments doivent diriger leur épaisseur dans le sens de l'effort de compression.

1° Il faut qu'ils puissent s'orienter et pour cela il est nécessaire qu'ils puissent se détacher et que leur mouvement ne soit pas gêné par les tranches inférieures : il est donc nécessaire que l'appareil soit « à volume constant », ou mieux à volume croissant, c'est-à-dire que l'angle de prise soit faible à la fente.

2° Il faut qu'ils s'orientent dans la direction optimale. Leur tendance naturelle les y pousse. Pour l'accentuer on peut donner aux surfaces broyantes un certain angle avec la direction de la pesanteur (ou de la force centrifuge) : on sait en effet qu'un fragment allongé jeté sur une table horizontale ne se place pas debout, mais couché.

130. — C) Il faut casser les fragments au bon endroit (c'est évidemment là que réside la difficulté).

Pour cela nous voyons deux moyens :

1° Poinçonner chaque fragment par une ou deux arêtes de dents agissant de part et d'autre, et au bon endroit. (C'est un peu ce que fait le tailleur de pierres, avec cette différence qu'il fait l'opération en deux fois; d'un côté avec son burin et de l'autre avec son marteau). Ce procédé qui semble le meilleur *a priori* paraît difficile à réaliser pratiquement, bien qu'il ne soit pas impossible à concevoir.

2° Faire passer les fragments entre deux surfaces broyantes de courbures opposées de rayons de courbure aussi faibles que possible (fig. 99).

Par exemple dans un appareil à noix convexe et boisseau concave.

Il est évident que les fragments plats ou allongés sont alors cassés correctement si la course n'est pas trop forte. (Sinon les fragments sont d'abord cassés en donnant des fragments ramassés, mais sans qu'ils aient le temps de changer d'orientation ils sont immédiatement recassés. Or la courbure des surfaces broyantes n'a d'effet que si les fragments sont orientés.)

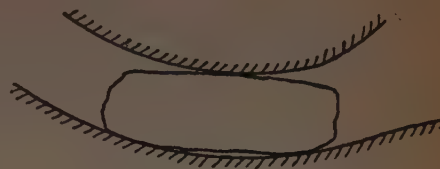


FIG. 99.

A défaut de surface sphérique, des surfaces cylindriques ou coniques cassent tous les fragments plats, mais elles ne cassent pas tous les fragments allongés. C'est ce qui se passe dans les appareils giratoires, à condition que le rayon de la fente soit faible, et dans certains appareils à mâchoires prolongées par des surfaces cylindriques d'axe horizontal.

C'est aussi le principe des dents des mâchoires qui sont généralement placées en quinconce (fig. 100) (De plus, le réglage est plus constant qu'avec des dents en vis-à-vis.)

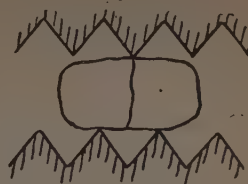


FIG. 100.

131. — D) Ces deux méthodes sont d'autant mieux réalisables que la courbe granulométrique est plus sélective un peu avant la sortie.

132. — E) Variation de la forme en fonction des paramètres de la fragmentation.

##### 1° NATURE DE LA ROCHE.

Les plans de clivage sont des zones de moindre résistance qui ne demandent qu'à se rompre, de sorte que les roches feuilletées donnent beaucoup de fragments plats.

M. PAVILLON et M. RÖSSLEIN signalent que généralement une roche dure donnerait des produits moins ramassés qu'une roche tendre dans les mêmes conditions de fragmentation.

## 2° EMBLACEMENT DANS L'ÉCHELLE DE TAMISAGE.

On peut dire qu'en général :

- a) Les plus gros fragments sont allongés (autrement ils ne pourraient pas passer par la fente;
- b) Les fragments moyens sont ramassés;
- c) Les petits fragments sont plats ou allongés (sans doute parce qu'ils proviennent d'autoconcassages).

Par exemple, les gravillons provenant d'un concassage primaire sont plats.

## 3° TYPE D'APPAREIL.

Il semble que pour les appareils existant actuellement, les produits les plus ramassés soient donnés par les appareils à marteaux. Mais nous avons vu que ces appareils ne permettent pas de fragmenter économiquement des roches siliceuses (n° 85).

Le Simplex donne des fragments un peu plus ramassés que le BLAKE, probablement parce que le mouvement de la mâchoire mobile favorise l'orientation des fragments, mais la différence est minime.

## F. — Répartition des formes.

133. — Si nous considérons une caractéristique de

forme d'un ensemble de fragments, sa courbe de fréquence est une *courbe de Gauss* d'après la théorie des probabilités.

Des études systématiques ont conduit M. PAVILLON à des modules moyens d'allongement  $\left(\frac{l}{d}\right)$  et d'aplatissement  $\left(\frac{d}{e}\right)$  respectivement voisins de  $\frac{1}{0,65}$  et  $\frac{1}{0,70}$  (Ces chiffres correspondent à peu près à la forme des galets marins 1/1, 5/2, 5)

## G. — Relation entre la forme et la qualité.

134. — Nous avons vu que la résistance à l'usure et aux chocs réciproques (ou *qualité*) dépend de la forme des fragments, et que le *coefficient de qualité* est plus grand pour des cubes que pour des fragments plats ou allongés (n° 44). De là à spécifier des coefficients de forme, pour les matériaux routiers en particulier, il n'y a qu'un pas qu'il serait dangereux de franchir sans se préoccuper des caractéristiques de la roche.

La forme des fragments n'a qu'une influence *indirecte* sur les caractéristiques mécaniques. Il est donc certain que des essais de résistance au choc et des essais de résistance à l'usure sont beaucoup plus importants pour les spécifications à imposer aux matériaux (voir n° 40).

# V. — INSTALLATIONS DE CONCASSAGE

## A. — EXPRESSIONS DIVERSES

135. — On emploie souvent les mots *dégrossissage* et *finissage*, *concassage primaire* et *concassage secondaire* qui n'ont pas de signification précise admise universellement.

Pour fixer les idées, on peut dire que :

- Le « débitage » fournit des moellons (n° 2);
- Le « concassage » fournit des pierres cassées;
- La « granulation » fournit des gravillons;
- Le « broyage » fournit des sables;
- La « pulvérisation » fournit des farines.

Le débitage est fait par :

- Des appareils à mâchoires
- Des appareils giratoires.

Le concassage et la granulation par :

- Des appareils à mâchoires;
- Des appareils giratoires;
- Des appareils à cylindres;
- Des appareils à marteaux.

Le broyage et la pulvérisation par :

- Des appareils à cylindres;
- Des appareils à boulets;
- Des appareils à marteaux;
- Des appareils à meules;
- Des appareils à pilons.

## B. — PRINCIPES D'INSTALLATION

136. — Les principaux paramètres qui déterminent le plan d'une installation sont :

- La nature des matériaux et leurs dimensions;
- La granulométrie exigée des produits finis, leur forme et leur débit;
- La sécurité de la fragmentation (n° 139);
- Les capitaux dont dispose l'entreprise.

## C. — TAUX DE RÉDUCTION DES APPAREILS

137. — Ce taux conditionne en particulier le nombre d'étages de l'installation.

- Appareils à mâchoires et giratoires : 4 à 10;
- Appareils à cylindres lisses : 2 à 3;
- Appareils à boulets : 20;
- Appareils à marteaux : 10 à 30.

## D. — DÉBIT

138. — Les courbes de débit granulométrique d'un appareil se déduisent des courbes granulométriques du produit en multipliant leurs ordonnées par les débits correspondants. [Voir l'étude des débits aux nos 55 (mâchoires), 62 (Simplex), 67 (Giratoire), 69 (Cyracône), 72 (Disques), 73 (Cylindres).]

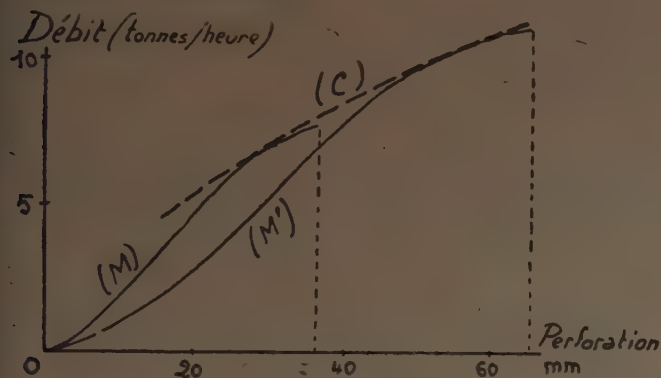


FIG. 101.

Pour un appareil et un matériau déterminés, elles forment une famille de courbes telles que (M) et (M') (fig. 101) dont l'enveloppe (C) correspond en général à 10 à 15 % de refus pour chaque courbe. Cette courbe (C) donne les débits maxima correspondant à des dimensions données.

Remarque : Le débit pratique d'une installation ne dépasse guère en général la moitié du débit théorique, car il faut tenir compte du mauvais temps, des avaries, de l'entretien, du remplacement des pièces d'usure, etc...

## E. — SÉCURITÉ

139. — Les morceaux de métal tels que des pioches, des boulons, etc., qui sont ramassés accidentellement par les pelles mécaniques en même temps que les matériaux, sont dangereux pour les appareils, en particulier pour les concasseurs secondaires dont ils peuvent provoquer la rupture des paliers.

Pour éviter ce danger, il faut prévoir :

1° L'enlèvement de ces morceaux de métal.

Triage à la main (minerais);

Électro-aimant ou poulie magnétique en tête de la courroie transporteuse d'alimentation (mais l'acier au manganèse n'est pas magnétique);

2° Ou bien l'arrêt instantané de l'appareil au cas où les surfaces broyantes rencontrent un corps trop dur :

Courroie longue et peu tendue et débrayage automatique des volants;

Volets de rupture (appareils à mâchoires);

Ressorts (ou rondelles Belleville) permettant éventuellement l'écartement des surfaces broyantes (appareils à mâchoires, appareils giratoires, appareils à cylindres).

## F. — FORCE MOTRICE

140. — Les moteurs doivent autant que possible être assez puissants pour permettre le départ en charge, en particulier pour les appareils primaires dont le vidage en cas d'arrêt serait long et incommode. Certains appareils ont deux moteurs dont les puissances sont dans le rapport de 2 à 1 et dont le plus fort ne sert qu'au démarrage.

La puissance moyenne effective consommée est d'environ 40 kW (ou 50 CV) par mètre carré d'ouverture de l'appareil.

On peut dire aussi que :

Les appareils à mâchoires consomment environ 0,6 kWh par tonne de matériau;

Les appareils giratoires consomment environ 0,5 kWh par tonne de matériau;

Les appareils à cylindres consomment environ 0,4 kWh par tonne de matériau.

Mais ces chiffres ne sont évidemment qu'un ordre de grandeur.

La puissance nominale nécessaire aux moteurs pendant la marche s'obtient en multipliant la puissance moyenne effective consommée par :

2 pour les appareils à mâchoires;

1,6 pour les appareils giratoires et les appareils à marteaux;

1,3 pour les appareils à cylindres.

## G. — PRIX DE REVIENT DES PRODUITS FINIS

141. — Les principaux facteurs qui déterminent le prix de revient des produits finis sont :

1° L'achat de l'installation et son amortissement. (Pour traiter des matériaux de même dimension, l'ordre de cherté décroissant des appareils est à peu près : giratoire, cylindres, BLAKE, Simplex, marteaux).

2° La force motrice;

3° Les pièces d'usure (et le lubrifiant);

4° La main-d'œuvre;

5° Les matériaux de rebut qui ne peuvent pas être vendus « farines ».

(Les facteurs 2°, 3° et 4° sont à peu près d'égale importance.)

## H. — FONDATIONS DES APPAREILS

142. — Par suite des vibrations considérables développées pendant la fragmentation, les fondations des

appareils doivent être en béton très résistant.

On peut aussi suspendre les appareils secondaires à un bâti en béton armé, par l'intermédiaire de tiges métalliques et de rondelles de caoutchouc.

## CONCLUSION

Cet exposé ne met pas un point final à la théorie de la fragmentation des roches.

Certains points restent obscurs, qui ne sont pas les moins ardu.

Et nous avons ébauché plusieurs sujets qualitativement, qu'il reste à poursuivre quantitativement en juxtaposant l'expérience et la théorie, ce qui n'est pas toujours le plus facile.

## BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

- A. GATES. — The crushing surface diagram (*Eng. and Mining Jour.*, vol. 95, 1913). Diagramme de GATES (n° 100).
- A. MESNAGER. — Matériaux de construction. Pierres (1923). Caractéristiques et essais des pierres (Chap. II). Etude des ruptures.
- E. C. BLANC. — Technologie des concasseurs, broyeurs et tamiseurs (1924).
- G. MARTIN. — Recent research in the science of fine grinding done by the british portland cement research association between 1923 and 1925 (*Jour. soc. chem. ind.*, vol. 45, 1926). Loi de l'intérêt composé (n° 122).
- J. GROSS, S. R. ZIMMERLEY and A. PROBERT. — A method for the sizing of ore by elutriation (*Rep. of investigations* 2951. Bureau of Mines, 1929). Décantation (n° 13).
- J. GROSS and S. R. ZIMMERLEY. — Milling methods (1930). Dissolution du quartz par FH (n° 14). Machine à poids (n° 41).
- L. A. WAGNER. — A rapid method for the determination of the specific surface of portland cement (*A. S. T. M. Proceeding*, 1933, p. 553). Turbidimètre (n° 12).
- R. S. DEAN, J. GROSS and C. WOOD. — Measurement of crushing resistance of minerals by the scleroscope (*Rept. of investigations* 3223. Bureau of Mines, 1934, p. 33). Scléromètre à poids (n° 43).
- G. CIMATO. — La prova di frantumazione per le graniglie (*Le Strade*, septembre 1935). Essai des gravillons routiers par cylindrage (n° 40).
- H. DEJEAN. — Concassage, broyage, criblage, appliqués aux travaux publics (*Revue Travaux de Science et Industrie*, octobre 1935). Loi des tangentes (n° 107).

- C. W. DAVIS and M. HARTENHEIM. — A simple method for the determination of coercitive force (*Rev. of Sci. instruments*, mars 1936). Mesure de la surface de la magnétite (n° 15).
- R. FERET. — Sur la forme et l'état de surface des éléments inertes des bétons (1937). Dimensions des fragments. Représentation de WALTZ (n° 3).
- G. CIMATO. — Influenza della forma dei pezzi di pietrisco sul coefficiente di qualità (*Le Strade*, mai 1937). Variation du coefficient de qualité avec la forme des fragments (n° 44).
- J. GROSS. — Crushing and Grinding (*U. S. Bureau of Mines. Bulletin* 402, 1938). Surface théorique et surface réelle (n° 19).
- LEA et NURSE. — The specific surface of fine powders (1939). Mesure de la surface spécifique par la perméabilité (n° 22).
- A. H. M. ANDREASEN. — The fineness of solids (1939). Mesure de la surface spécifique par sédimentation (n° 11).
- A. F. TAGGART. — Handbook of mineral dressing (1945). La fragmentation des roches sous tous ses aspects.
- J. PIRLOT. — La technique moderne du broyage dans les industries minières (*Revue Science et Technique*, 1944 (n°s 7, 8, 9, 10); 1945 (n°s 1, 3, 4, 11); 1946 (n°s 1, 3, 5, 7, 9, 11); 1947 (n°s 3, 5). Technologie des appareils (Chap. III).
- A. PAVILLON. — Gravillons routiers. Cubicité et qualité (Circulaire n° 20, série D., 1947). Carré des formes (n° 3).

TRAVAUX PUBLICS, N° 1

CENTRE D'ÉTUDES SUPÉRIEURES

EXPOSÉ DU 6 AVRIL 1948

Sous la présidence de **M. GUY**,

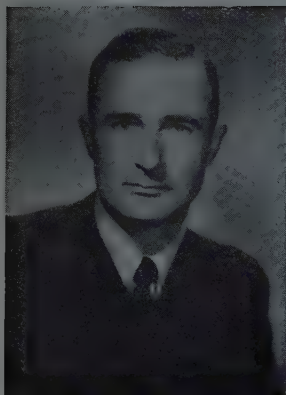
Directeur général des Travaux maritimes au Ministère de la Marine.



CAISSON MOBILE AUTO-FLOTTEUR  
A AIR COMPRIMÉ

Par **M. Jacques CAMBON**, Ingénieur spécialiste en fondations à l'Air Comprimé.

## ALLOCUTION DU PRÉSIDENT



**M. GUY**

M. CAMBON a bien voulu me demander de présider la conférence qu'il va prononcer aujourd'hui devant vous et au cours de laquelle il vous exposera les caractéristiques originales d'un caisson mobile à air comprimé qu'il a étudié en 1946 et en 1947 et qui est actuellement en service au Port militaire de Brest.

Je m'excuse tout d'abord de déroger volontairement à un usage qui veut que le Président de toute conférence présente le conférencier aux auditeurs :

M. Jacques CAMBON a en effet acquis, comme ingénieur spécialiste en fondations à l'air comprimé, une renommée telle qu'il me paraît inutile de rappeler toutes les réalisations auxquelles il a apporté son éminente collaboration, qu'il s'agisse de

fondations de ponts-routes ou de ponts-rails, d'ouvrages maritimes ou d'ouvrages souterrains nécessitant l'emploi de procédés spéciaux.

La Marine Nationale n'a donc pas hésité à donner son agrément à l'intervention de M. Jacques CAMBON comme Ingénieur-Conseil dans les travaux de construction d'un quai d'armement qui ont été confiés fin 1946 aux entreprises DUMEZ et DODIN : le dispositif technique adopté pour cet ouvrage nécessitait en effet l'emploi d'air comprimé pour la préparation des socles de fondation des caissons en béton armé qui constituent son infrastructure, l'importance relativement réduite des travaux — de l'ordre de 400 millions aux cours actuels — ne permettant pas par ailleurs d'amortir sur un tel chantier la construction d'un caisson mobile du type classique.

M. Jacques CAMBON a donc été conduit à étudier un caisson mobile auto-flotteur d'un type tout à fait nouveau et je lui passe, sans plus attendre, la parole, pour lui permettre de vous exposer les caractéristiques originales d'un engin qui vient de faire largement ses preuves après plus d'un an d'utilisation continue.

## RÉPONSE DE M. CAMBON

Je vous remercie bien sincèrement, Monsieur le Président, des termes très élogieux avec lesquels vous venez de me présenter à cette assemblée d'élite.

J'apprécie à son prix le grand honneur de parler sous vos auspices, d'autant que le caisson mobile à l'air comprimé auto-flotteur, objet de cet exposé, sert à construire un ouvrage dépendant, directement, de vos éminents services.

Je suis heureux, Monsieur le Directeur, de vous avoir vu accepter de présider cette modeste conférence et, appuyé par l'autorité de votre nom et de votre savoir, je ferai tous mes efforts pour me montrer digne de la bienveillante sollicitude que vous voulez bien me témoigner.

J'aurai garde de ne pas être à la hauteur de ma tâche, pour ne pas infirmer le presque demi-siècle que j'exerce dans les travaux à l'air comprimé appliqué aux fondations, qui m'ont toujours passionné.

Je remercie, en outre et d'avance, les hautes personnalités présentes qui me font le grand honneur de venir m'écouter, ainsi que tous mes amis, toutes mes connaissances et mes élèves et anciens élèves.

Je ne veux pas oublier de remercier de l'aide qu'ils m'ont apportée : MM. CALONI et LEBELLE, ainsi que tous leurs collaborateurs, dans la préparation de cette séance, et tous ceux qui me sont proches et qui m'ont assuré de leurs services dévoués, sans oublier MM. KELLER et TRUCHOT.

Merci encore, Monsieur le Président.



**M. CAMBON**

## EXPOSÉ DE M. CAMBON

Le sujet que je vais traiter n'est pas nouveau en son principe et le caisson, objet de mon exposé, est une adaptation nouvelle conçue pour servir et répondre à une actualité : la Reconstruction du mur de quai d'armement de l'Arsenal de la Marine Nationale à Brest, dont les travaux s'exécutent.

Il y fonctionne actuellement et, qu'il me soit permis de le dire, à la satisfaction de l'Administration de la Marine, comme à celle des Entreprises réunies en participation : Dumez de Paris et Dodin de Nantes, qui sont chargées de l'exécution des travaux.

On me disait, dernièrement, « comme les peuples heureux, le caisson n'a pas d'histoire » et, jusqu'à présent, il rend les services sur lesquels on comptait.

Le but de la construction de notre appareil a été celui de faire un caisson-plongeur mobile, facile à échouer et à remonter par ses propres moyens, facile aussi à déplacer dans l'alignement du quai et donnant le moins d'encombrement possible.

Pour arriver à ce but, nous nous sommes décidés à munir le caisson de réservoirs-flotteurs permettant d'assurer sa flottaison parfaite.

En introduisant l'eau dans ces réservoirs, on peut faire descendre le caisson et l'échouer sur le fond du bassin ; en les vidant de leur eau, on peut faire remonter le caisson à nouveau.

Ce principe d'un caisson flottant a déjà fait ses preuves, il y a fort longtemps. Nous pouvons citer comme exemples : le caisson mobile de Zschokke à la Rochelle-Pallice et celui employé pour les fondations des quais de la Pinède à Marseille.

Nous avons cherché à perfectionner et à simplifier cette ancienne méthode de construction.

Nous avons notamment voulu utiliser l'air comprimé pour le vidage des réservoirs, afin de simplifier les manœuvres.

Nous avons ainsi muni les réservoirs de tuyauteries d'arrivée d'air comprimé en haut, sur leurs couvercles et de grosses vannes de sortie d'eau dans le bas.

En ouvrant ces dernières vannes et en introduisant l'air sous pression d'en haut, on chasse rapidement et complètement l'eau et l'appareil remonte automatiquement, sans l'utilisation d'aucune installation de pompage.

Mais beaucoup de problèmes de détail se présentaient pour donner à l'appareil suffisamment de souplesse.

Il a fallu utiliser la chambre d'équilibre au-dessus du plafond du caisson et étudier l'emplacement précis des arrivées et sorties d'air, assurer la stabilité et l'équilibre parfaits pendant la flottaison aux divers stades, et, enfin, la stabilité complète dans la position définitive du travail.

On est, par ces études, arrivé à un appareil flottant, facilement manœuvrable et qui fonctionne uniquement à l'air comprimé aussi bien à sa descente qu'à sa montée.

Les réservoirs-flotteurs ont été entourés d'une charpente métallique, surmontée d'une plate-forme de travail, créant un ensemble qui peut être remorqué sans aucune difficulté à son emplacement de travail (photo 1).

Ne voulant pas trop vous faire attendre, j'aborde l'exposé, en vous montrant, tout d'abord, la silhouette du caisson mobile auto-flotteur, pour vous donner une idée de ce qu'il est (fig. 1 et 2).

Comme les travaux sont en cours, et à la demande qui m'en a été faite, cela en raison de convenances toutes particulières, il ne sera pas fait de critiques ni de commentaires sur le caisson et son emploi.

À la suite des destructions massives faites par les Allemands au moment de leur départ de France, ou par les bombardements, très souvent réitérés des Alliés, pour les en chasser au plus vite, le quai d'armement de l'Arsenal de la Marine Nationale à Brest a été, on peut dire, complètement démoli, ou presque, sur toute sa longueur et son épaisseur.

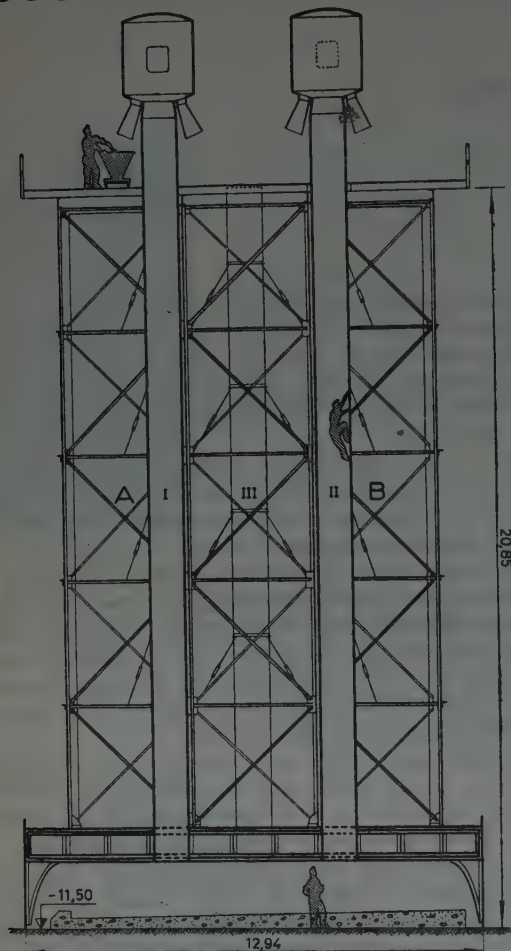
Il n'a pas été, malheureusement, le seul ouvrage endommagé, tant à l'Arsenal de Brest, que dans les autres ports militaires.

La Direction générale des Travaux de la Marine Nationale a envisagé, en septembre 1946, sa reconstruction, tout d'abord pour une première tranche sur une longueur de 275 m et, en plus, celle de deux ducs d'Albe de 50 m situés sur l'alignement général, qui s'incorporeraient dans le quai définitif prévu pour plus tard, sur une longueur de 700 m environ — comme deuxième tranche —. Quelques modifications ont été apportées.

La destruction, presque complète de l'ancien mur et l'amoncellement des décombres qui auraient nécessité des dragages inutiles et onéreux, ont fait reculer l'Administration pour le reconstruire à son ancien emplacement.

Elle en reporta la magistrale en avant de celle ancienne, comme indiqué sur la figure 3 et allant du point E au point B.

COUPE xx.



VUE EN PLAN.

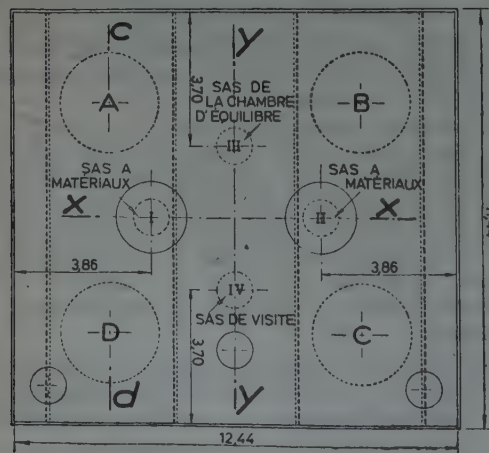
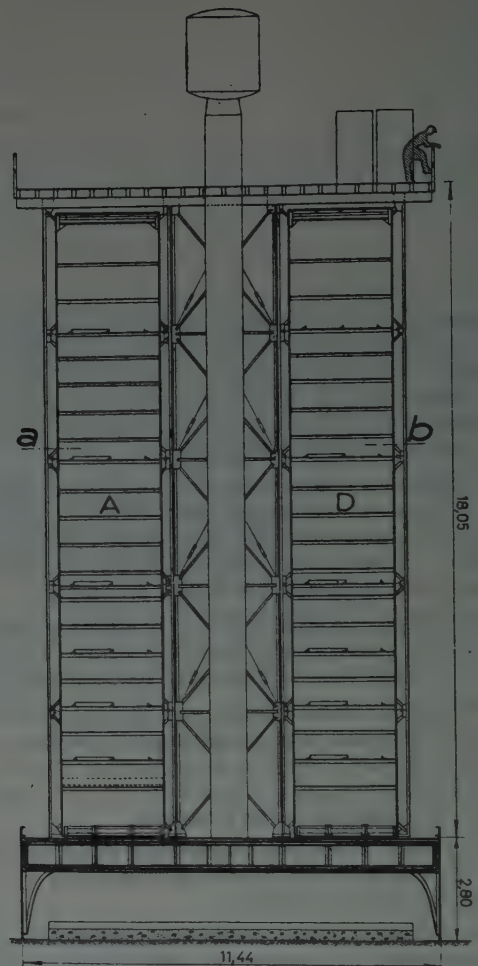


Fig. 1. — Coupe XX et plan.

ABCD, réservoir-flotteur. III, cheminée d'équilibre.  
I, II, cheminées, sas à matériaux. IV, cheminée de visite.

COUPE cd



COUPE ab

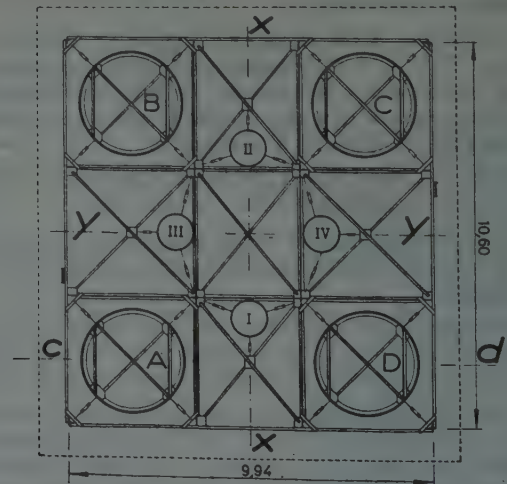


Fig. 2. — Coupe CD et plan.

ABCD, réservoir-flotteur. III, cheminée d'équilibre.  
I, II, cheminées, sas à matériaux. IV, cheminée de visite.

La construction des deux ducs d'Albe I et II, espacés de 50 m l'un de l'autre, devait être réalisée immédiatement, en première phase, pour permettre d'y venir amarrer le cuirassé « Jean-Bart » échoué dans la forme de Laninon, et dès qu'il en serait libéré (fig. 3).

La Direction des Travaux de la Marine mit en adjudication-concours la reconstruction du quai, à laquelle diverses entreprises importantes prirent part.

Plusieurs propositions intéressantes furent présentées, mais, l'attention de l'Administration se porta sur le projet d'ensemble dressé par les Entreprises DUMÉZ et DODIN, réunies en participation.

Un premier projet fut soumis par ces entreprises et qui était constitué par un caisson mobile à l'air comprimé, devant permettre l'exécution de socles à la cote (— 11 m) environ, sur lesquels devaient reposer, après échouage, des caissons en béton armé avec fond et devant former le mur de quai.

Ce caisson mobile, primitivement présenté, avait été prévu pour être porté par deux bateaux-chalands, réunis par une charpente « ad hoc », à laquelle il devait être suspendu au moyen de vérins.

C'était le type courant des caissons mobiles (photo 2).

Toutefois, au lieu d'employer un caisson mobile pour construire les socles, on aurait pu employer le système dont on a fait usage à Cherbourg pour la construction des murs de quai sur près de 2000 m, c'est-à-dire des caissons en béton armé avec chambre de travail et équipés pour être foncés à l'air comprimé et en eau profonde. Tel n'est pas le cas ici.

On voit, néanmoins, sur la photographie 3, le remorquage d'un caisson de  $33,33 \times 16,25 \times 6,25$ , allant à son lieu d'emploi.

A la suite de diverses nécessités, nées de la position de la magistrale AE et de difficultés de mouvements, un deuxième projet fut dressé et constitué par un caisson mobile à l'air comprimé auto-flotteur, donnant une plus grande souplesse pour l'exécution des travaux et moins d'encombrement, puisque les deux bateaux-chalands porteurs étaient supprimés.

En résumé, le mur de quai sera constitué, sur toute sa longueur, par des caissons en béton armé avec fond, qui seront échoués à la cote (— 11 m) environ, sur un radier en béton préalablement exécuté à l'aide du caisson mobile à l'air comprimé.

Ce caisson, de par sa construction, permettra, toutefois, de descendre plus bas et, suivant les besoins, jusqu'aux cotes (— 11,50 m), voire même (— 12 m).

Les radiers-socles seront construits de façon à observer, sur leur plan supérieur, une inclinaison donnant au caisson en béton armé placé au-dessus, le fruit nécessaire demandé pour le quai. De plus, un talon prévient tout glissement possible (fig. 1 et 2).

Le but de la Conférence étant la description du caisson mobile à l'air comprimé auto-flotteur en métal, nous ne nous étendrons pas sur les travaux des caissons en béton armé, ni sur leur construction et mise en place (Voir photographies, pages 19 et 20).

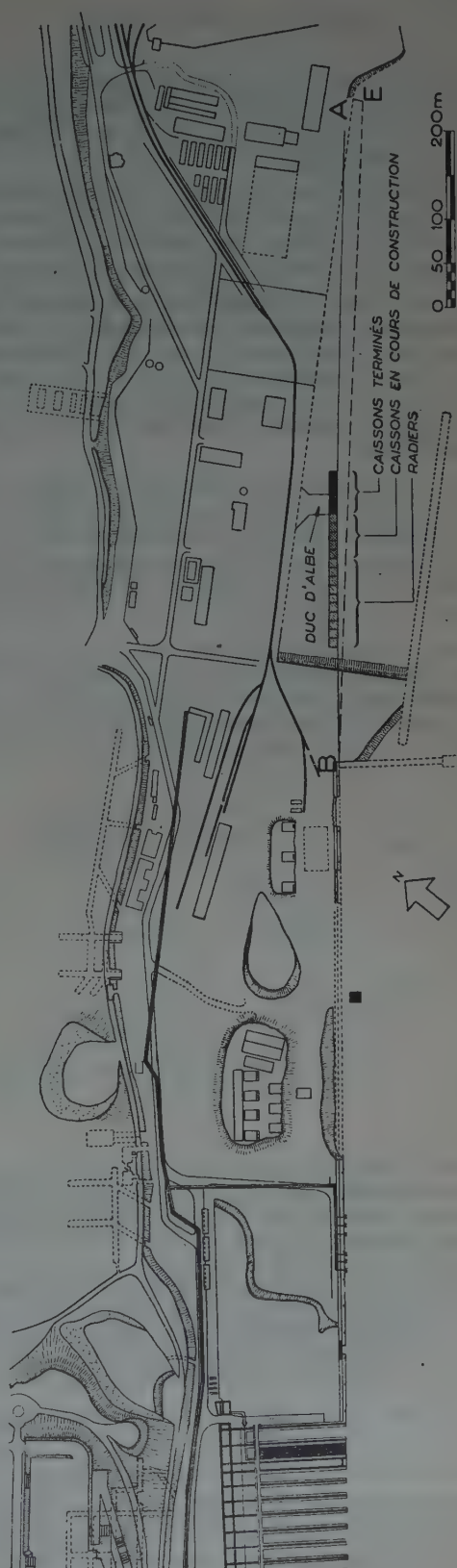


Fig. 3. — Plan général.

## CAISSON AUTO-FLOTTEUR

Avant de vous en exposer la composition, je vous dirai que les Entreprises DUMÉZ et DODIN avaient choisi, comme constructeur métallique, la Compagnie des Ateliers de Fives-Lille.

Nous devons à notre ami, M. Delcamp, ingénieur à cette Compagnie, d'avoir été saisi par ces entreprises de génie civil, de l'étude du caisson et de ses accessoires, y compris surtout l'équipement à l'air comprimé.

Nous remîmes à la Compagnie de Fives-Lille, au fur et à mesure de l'avancement des études, tous les plans, détails et notes de calculs, pour leur permettre de dresser ceux d'ateliers et de construction (que nous devions revoir, vérifier, corriger et modifier si nécessaire, suivant les besoins). Les notes de calcul ont été très importantes.

Toutes les pièces du caisson furent préparées aux Ateliers de Fives et envoyées à Brest, prêtes pour le montage, l'assemblage et le complément de rivetage.

Ce montage et ce rivetage furent faits dans la forme 19 de la base sous-marine, jusqu'à une certaine hauteur que nous verrons plus loin.

Le reste de la construction du caisson devant se faire hors de la forme précitée (c'est-à-dire après la sortie de la première partie construite), devait être échoué dans le port sur un emplacement préparé par dragage à la cote ( $-7$  m), formant banquette (photo 7 et fig. 4).

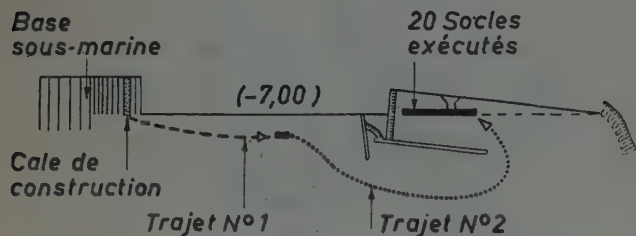


Fig. 4. — Trajet du caisson de la cale de construction au lieu de travail.

La hauteur définitive du caisson ne permettait pas de le construire tout entier dans la cale sèche de la base sous-marine, à cause du seuil de cette dernière, qui se trouve à la cote ( $-2,20$  m).

Le caisson devait être construit partiellement sur une hauteur de 15,50 m au-dessus du couteau de la chambre de travail, tandis que sa hauteur totale devait être de 20,853 m jusqu'au-dessus de sa plate-forme supérieure, non compris les sas et accessoires.

Cette hauteur de 20,853 m vous représente celle d'une maison de six bons étages à Paris.

Ce caisson prenait l'aspect d'un monument.

D'autre part, en raison de l'espace laissé libre entre le seuil et le pont roulant de la cale sèche, on ne pouvait pas adopter une hauteur plus grande que 15,50 m.

Toutefois, cette cale sèche a permis de réaliser, et à l'abri, la plus grande partie de la construction de ce caisson mobile, de même que celle des caissons en béton armé.

Toutes précautions furent prises pour la sortie du caisson de la cale sèche en utilisant les plus hautes marées.

Le caisson mobile auto-flotteur à l'air comprimé est composé des parties :

1° à la base.

a) Une chambre de travail de 2 m de hauteur environ ;

b) Une chambre d'équilibre de 0,80 m de hauteur environ.

La surface de la chambre de travail à la génératrice du couteau est de 145 m<sup>2</sup> environ, soit  $12,94 \times 11,44$ .

La hauteur totale de la chambre de travail, de la chambre d'équilibre et des épaisseurs de métal, est de 3,096 m.

2° En superstructure, au-dessus de ce qui précède, une charpente métallique, formant estacade, haute de 17,50 m.

3° Quatre réservoirs fixés à la partie supérieure du caisson et enfermés dans l'estacade (fig. 1 et 2).

Ces réservoirs ont 2,85 m de diamètre et 17,40 m de hauteur, en tôle de 6 mm d'épaisseur.

Ils auraient dû avoir 3 m de diamètre, mais, pour eux, comme pour certaines parties du caisson, la pénurie de métal, à l'époque de sa construction, a nécessité des réductions préjudiciables et, cela, un peu partout, mais qui ont été corrigées.

Soit dit en passant, si on avait pu compter sur un contingent convenable de tôles et de profilés, on n'aurait pas été obligé d'envisager une chambre d'équilibre.

4° A la partie supérieure de l'estacade, une plate-forme de travail d'où se feront, plus tard, toutes les manœuvres du caisson et des sas, du remplissage et vidage des réservoirs, etc...

5° Quatre cheminées de 1 m de diamètre, mettant en communication les divers sas avec la chambre de travail et la chambre d'équilibre.

Comme nous l'avons indiqué déjà, le caisson mesure, au couteau, en plan, 12,94 m sur 11,44 m.

### Caisson proprement dit. — Dispositions générales.

L'ossature est constituée par un poutrage composé, sur le grand côté, de dix poutres principales, reliées, dans la partie centrale, par deux poutres transversales.

Les abouts des dix poutres principales reposent sur des consoles verticales.

Sur les petits côtés du caisson et sur chacun d'eux sont placées sept consoles identiques (fig. 5).

L'ensemble forme, avec les précédentes, la crinoline du caisson, et sur lesquelles sont rivées, à l'extérieur, des tôles formant bordé, le tout, constituant l'enceinte verticale de la chambre de travail.

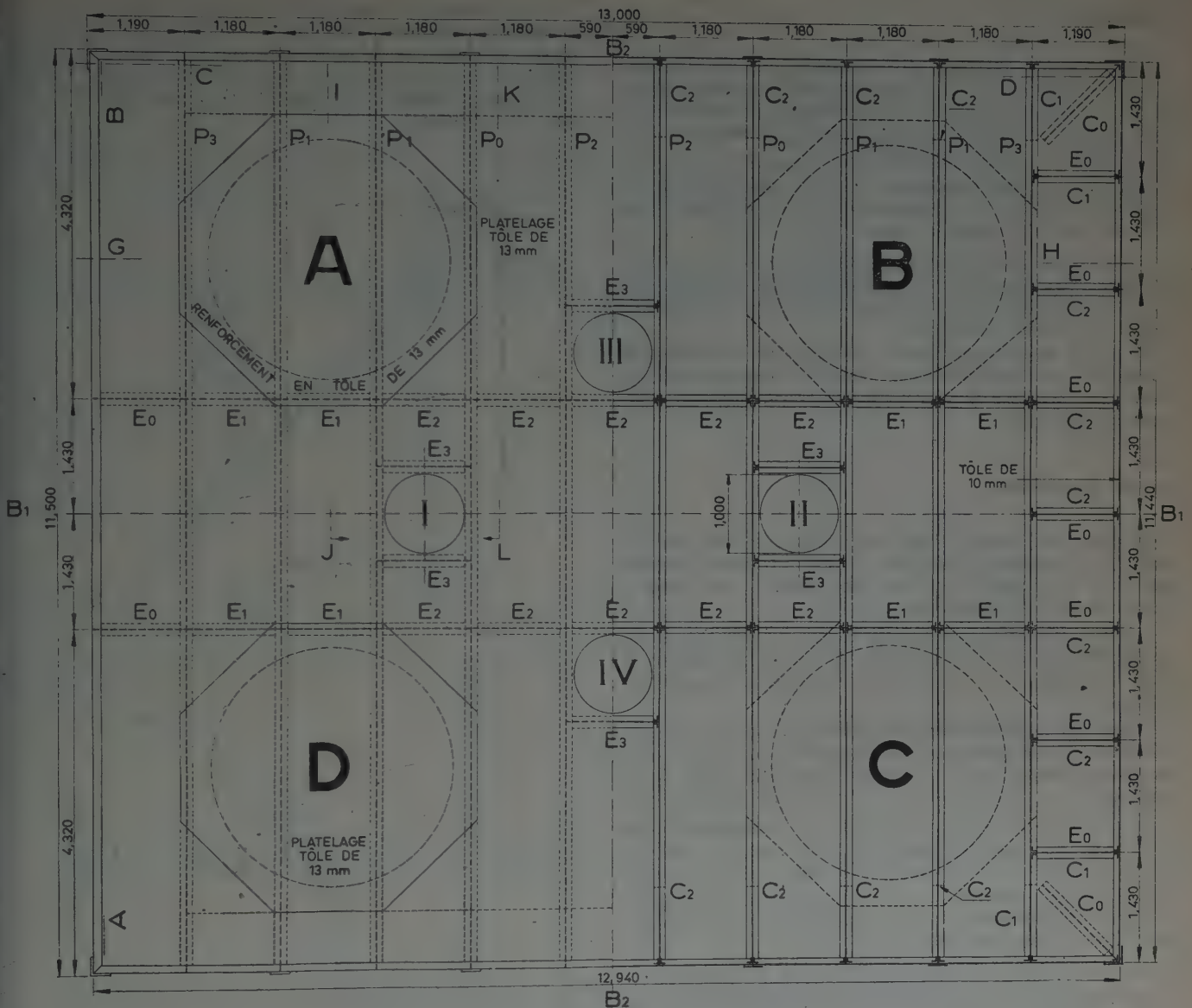


Fig. 5. — Plan des platelages.

Cette dernière est donc limitée par le bordé et, à la partie supérieure, par la poutraison.

Le plan inférieur de la poutraison, qui forme le plafond de la chambre de travail, est tapissé, sur toute sa surface, par un ensemble de tôles de 13 mm d'épaisseur, rivées très soigneusement aux cornières formant semelles inférieures des poutres.

Le plan supérieur de la poutraison est recouvert aussi par un ensemble de tôles de 13 mm d'épaisseur, rivées sur les cornières formant semelles supérieures des poutres.

Le poutrage est donc enfermé entre ces deux plans, et l'espace compris entre eux constitue une chambre d'équilibre.

Les tôles de la partie supérieure sont renforcées au-dessous de l'emplacement des réservoirs, par d'autres tôles de 13 mm et très soigneusement rivées ensemble pour assurer une résistance suffisante aux attaches des réservoirs flotteurs, dont nous parlerons ci-après, et absorber, ainsi, les efforts de la force ascensionnelle au moment de l'immersion du caisson et, surtout, quand ces réservoirs seront vides d'eau. (Principe d'Archimède.)

Le vide, laissé entre le plan inférieur et le plan supérieur de la poutraison, fera office de flotteur qui servira, par lestage ou par délestage à l'eau, à assurer les manœuvres de flottaison et de stabilité du caisson (fig. 1 et 2).

### Poutraison.

Les poutres principales et les quatre poutres transversales intermédiaires sont disposées en deux files et en plusieurs éléments divers ; elles sont à croisillons ou à âme pleine, suivant leur situation par rapport aux réservoirs et aux cheminées (fig. 5).

Les poutres principales ont 11,44 m de longueur et 0,826 m de hauteur et espacées l'une de l'autre de 1,18 m environ, d'axe en axe.

Les poutres intermédiaires sont réparties suivant le résultat des nécessités de construction et sur lesquels il n'est pas important de s'appesantir, la lecture des plans en donnant l'aperçu.

Ce qui a été surtout étudié, ce sont les attaches des cheminées et des réservoirs sur la poutraison et les tôles pour assurer la plus grande étanchéité et la plus grande résistance.

### Bordé et consoles.

Le bordé ou muraille qui entoure la chambre de travail et la chambre d'équilibre règne sur une hauteur de 2,796 m de son extrémité inférieure au plan supérieur de la poutraison (fig. 6).

L'extrémité inférieure et sur toute sa périphérie est renforcée par des larges plats et de fortes cornières pour constituer le couteau ou trousse coupante du caisson.

Il faut que cette partie soit très résistante pour éviter toutes déformations quand elle reposera sur des roches ou autres objets durs : épaves, ferraille, blocs perdus, etc...

La partie supérieure du bordé est surmontée d'un fer à U de 300 mm servant de rancher, ce qui porte la hauteur totale extérieure à 3,096 m.

Ce rancher permettra de constituer une défense pour les gueuses de lestage qui seront placées sur le caisson, afin d'éviter leur chute à l'eau.

Les tôles, formant bordé, ont 10 mm d'épaisseur.

Ce caisson mobile auto-flotteur, devant supporter des déplacements fréquents, a été construit d'une façon très robuste.

Les consoles supportant les abouts des poutres forment la crinoline ; elles sont disposées :

dix sur chacun des grands côtés et solidaires des poutres principales ;

sept sur chacun des petits côtés ;

quatre consoles d'angle.

L'ensemble total de ces vingt-deux dernières est fixé au plafond de la chambre de travail.

Toutes les consoles sont de forme incurvée pour permettre aux ouvriers et conducteurs de travaux un accès facile pour y procéder à un nettoyage convenable sous le couteau, au tracé des socles, au coffrage des bétons et autres dispositions nécessaires à prendre pour l'alignement.

Les dimensions des épaisseurs des tôles, plats, etc... et de tous profilés, ont été calculées pour résister à toutes les fatigues, mais aussi pour obtenir un outil capable de faire d'autres travaux de fonçage à l'air comprimé, après l'achèvement de ceux du mur de quai d'armement.

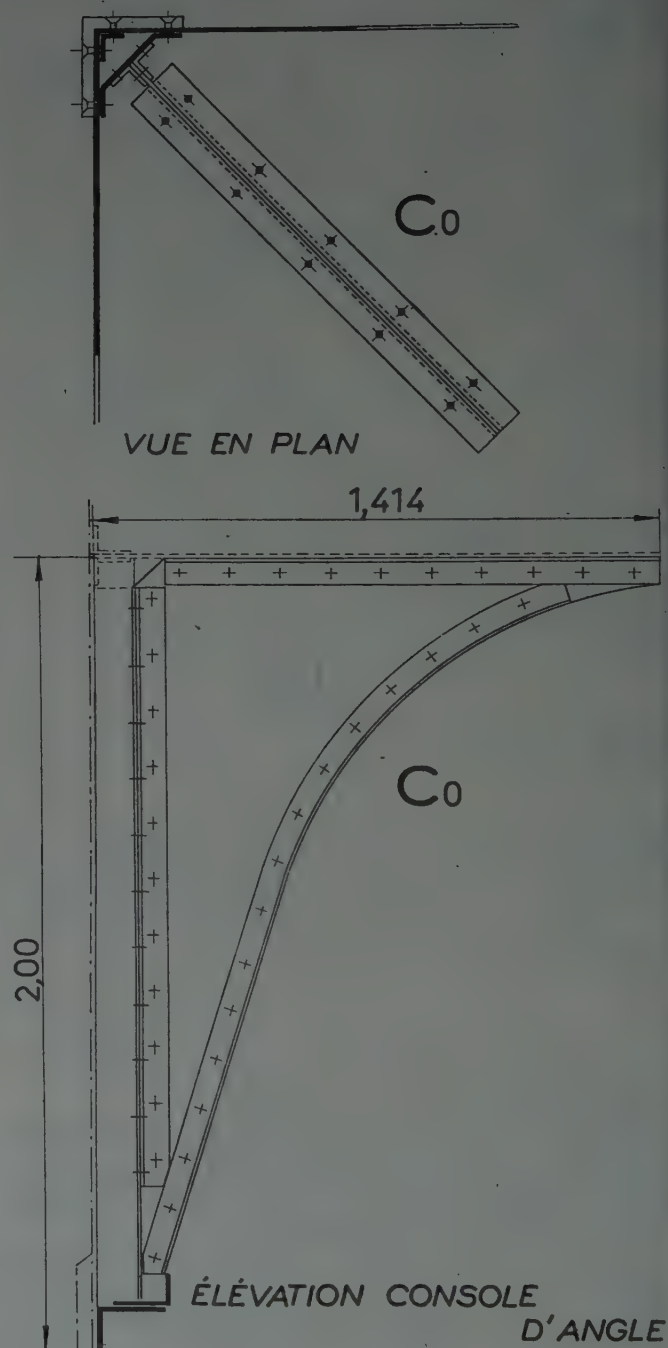
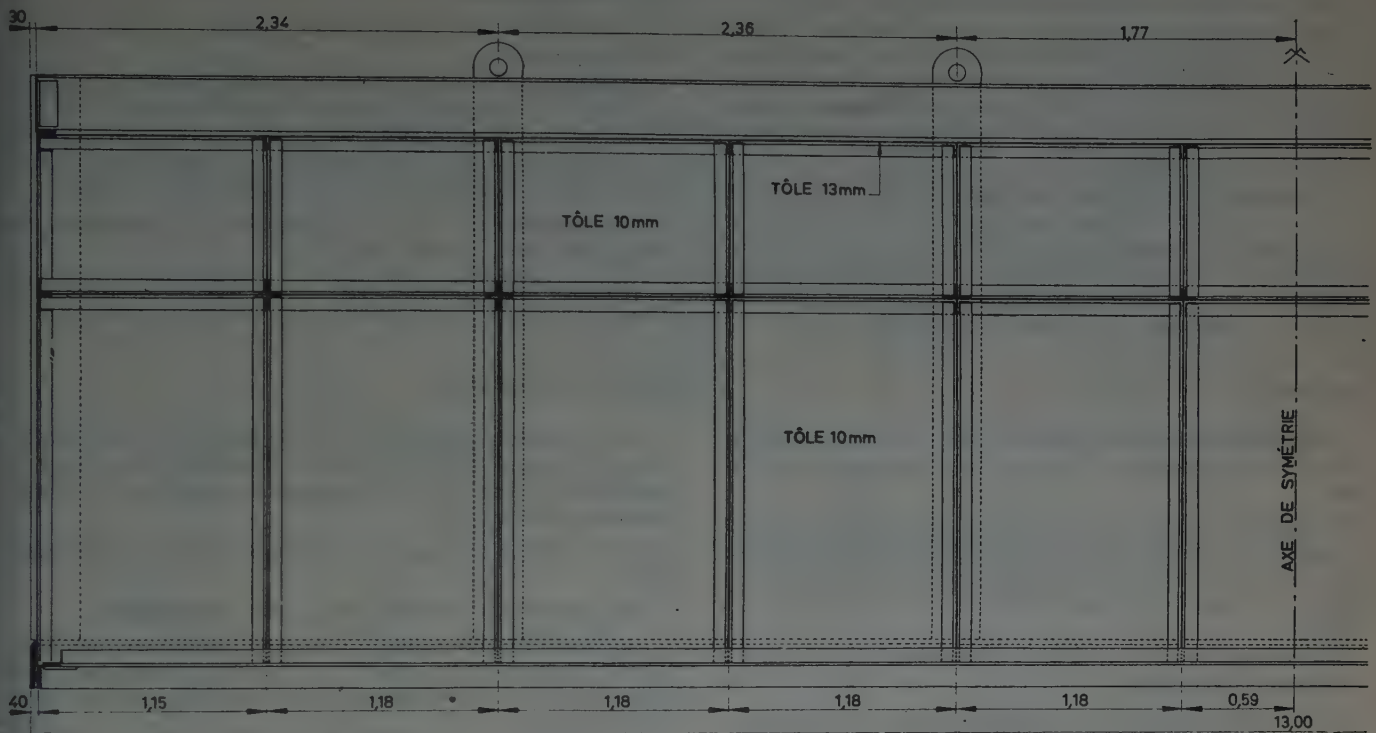


Fig. 6 a. — Bordés et consoles.

# TRAVAUX PUBLICS

Coupe AB.



Coupe CD.

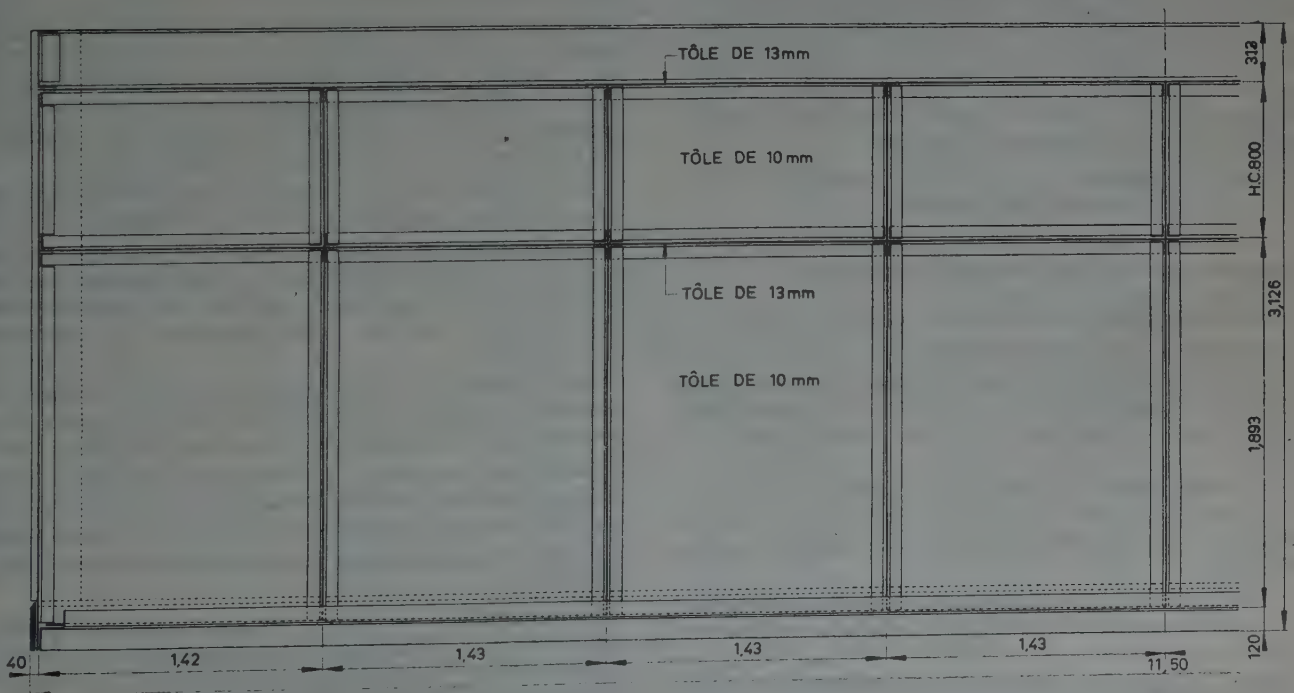


Fig. 6 b.

Le bordé est protégé extérieurement aux quatre angles verticaux par des cornières de  $250 \times 30$ .

De même, sur la périphérie, et judicieusement placés, sont des larges plats de  $250 \times 30$  faisant saillie à la partie supérieure du rancher en U et portant un œil pour l'amarrage des câbles de manœuvres et pouvant, le cas échéant, servir d'attache pour suspension éventuelle du caisson.

A mi-hauteur des consoles, sauf à celle des quatre angles, et sur tout le pourtour intérieur de la chambre de travail, des étagères en métal sont placées pour recevoir des gueuses arrimées, formant lest, et cela, le plus bas possible, pour concourir à la stabilité du caisson, et abaisser le centre de gravité.

### Plafond.

Comme nous l'avons déjà exposé, le dessous de la poutraison constitue le plafond de la chambre de travail.

Il est réalisé par des tôles de 13 mm d'épaisseur, sur laquelle font saillie des éléments de cornières supportant des crochets mobiles pour servir à la mise en place de planchers amovibles et éventuels, dans la chambre.

Le dessus de la poutraison constitue le plafond de la chambre d'équilibre.

Il est réalisé, comme nous l'avons déjà esquissé, par des tôles de 13 mm renforcées à la base des réservoirs flotteurs par une seconde tôle de 13 mm.

Dans la chambre d'équilibre, il a été coulé une aire en béton servant de lest d'une part et, d'autre part, de remplissage entre les cornières des membrures inférieures des poutres pour qu'il ne reste pas d'eau dans cette chambre, quand on sera amené à faire le vide et, aussi, pour pouvoir la canaliser par des pentes aboutissant à un puisard « ad hoc » où plongera un tuyau d'évacuation dit « siphon » quand on enverra de l'air comprimé pour en expulser cette eau.

Toutes les manœuvres de vidange sont faites à l'air comprimé sans secours de pompes.

### Charpente métallique formant estacades.

L'estacade métallique surmonte le caisson en retrait de chaque côté. Le rectangle de base est de  $10,606 \text{ m} \times 9,94 \text{ m}$

Elle est constituée par quatre rangs de poteaux dans chaque sens. Les poteaux sont reliés par un quadrillage de traverses horizontales dans des plans distants de 3,54 m.

Il y a cinq étages sur la hauteur, le tout croissillonné, à l'exception de quatre panneaux d'angle dans lesquels sont placés les réservoirs-flotteurs de 2,85 m de diamètre (fig. 1 et 2).

A ces derniers sont fixés des tendeurs à lanterne destinés à les maintenir, malgré leur attache solide sur le caisson.

Dans les quatre panneaux de la périphérie passent quatre cheminées de 1 m de diamètre, fixées aussi à

chaque étage par des tendeurs à lanterne pour éviter tous mouvements.

L'estacade a 17,50 m de hauteur jusqu'à l'étage triangulé supérieur.

Au-dessus de celui-ci sont placés, horizontalement au droit des poteaux, quatre rangées de fer à U de 30 cm de hauteur, destinés à supporter le poutrage et le platelage en bois constituant une plateforme pour toutes les manœuvres et commandes des travaux.

Les profilés ont 11,64 m de longueur et débordent de l'estacade proprement dite.

Des échelles métalliques, au nombre de quatre, assurent l'accès au plancher supérieur (photo 8).

### Réservoirs-flotteurs.

Les réservoirs-flotteurs, au nombre de quatre, sont placés, comme déjà exposé, à l'intérieur des quatre panneaux d'angle de la charpente métallique formant estacade (photo 9).

Ils ont 2,85 m de diamètre intérieur et 17,38 m de hauteur.

Les parois sont en tôle de 6 mm d'épaisseur.

Le fond, comme nous l'avons vu, est constitué par deux épaisseurs de tôles de 13 mm, soigneusement assemblées par rivetage, afin de travailler comme une seule pièce.

L'attache de ces tôles sur les poutres principales est complétée par deux poutres transversales à l'intérieur du réservoir, qui sont soigneusement rivées aux poutres principales, de façon à ramener tous les efforts ascensionnels sur ces dernières.

La partie supérieure du réservoir est fermée par un couvercle en tôle de 13 mm, tendu sur un système de trois poutres parallèles, attachées aux parois latérales et de trois poutrelles de répartition en cornières dans le sens perpendiculaire. Il doit résister aux pressions de l'eau, mais, aussi, de l'air comprimé.

Le couvercle est muni d'une trappe, à fermeture très étanche, pour permettre l'accès à l'intérieur (fig. 7).

A l'intérieur, les parois des réservoirs sont renforcées par des cornières circulaires et entretoisées par des raidisseurs qui concourent à éliminer les efforts de l'eau et de l'air comprimé qu'ils recevront au cours des manœuvres.

Des orifices sont pratiqués pour le passage des diverses tubulures d'eau ou d'air comprimé servant au remplissage ou à la vidange des réservoirs (fig. 1 et 2).

Dans les réservoirs, le fond a été recouvert d'une couche de béton servant de lest d'une part, et, d'autre part, de surface d'écoulement de l'eau vers un puisard.

Au fond des réservoirs sont aussi placées des gueuses de lestage.

Le lestage fixe du caisson est assuré par des gueuses placées sur les étagères de la chambre de travail à mi-hauteur de la crinoline, par le lest de béton de riblons dans les réservoirs et la chambre d'équilibre, soit au total 145 tonnes de lest fixe.

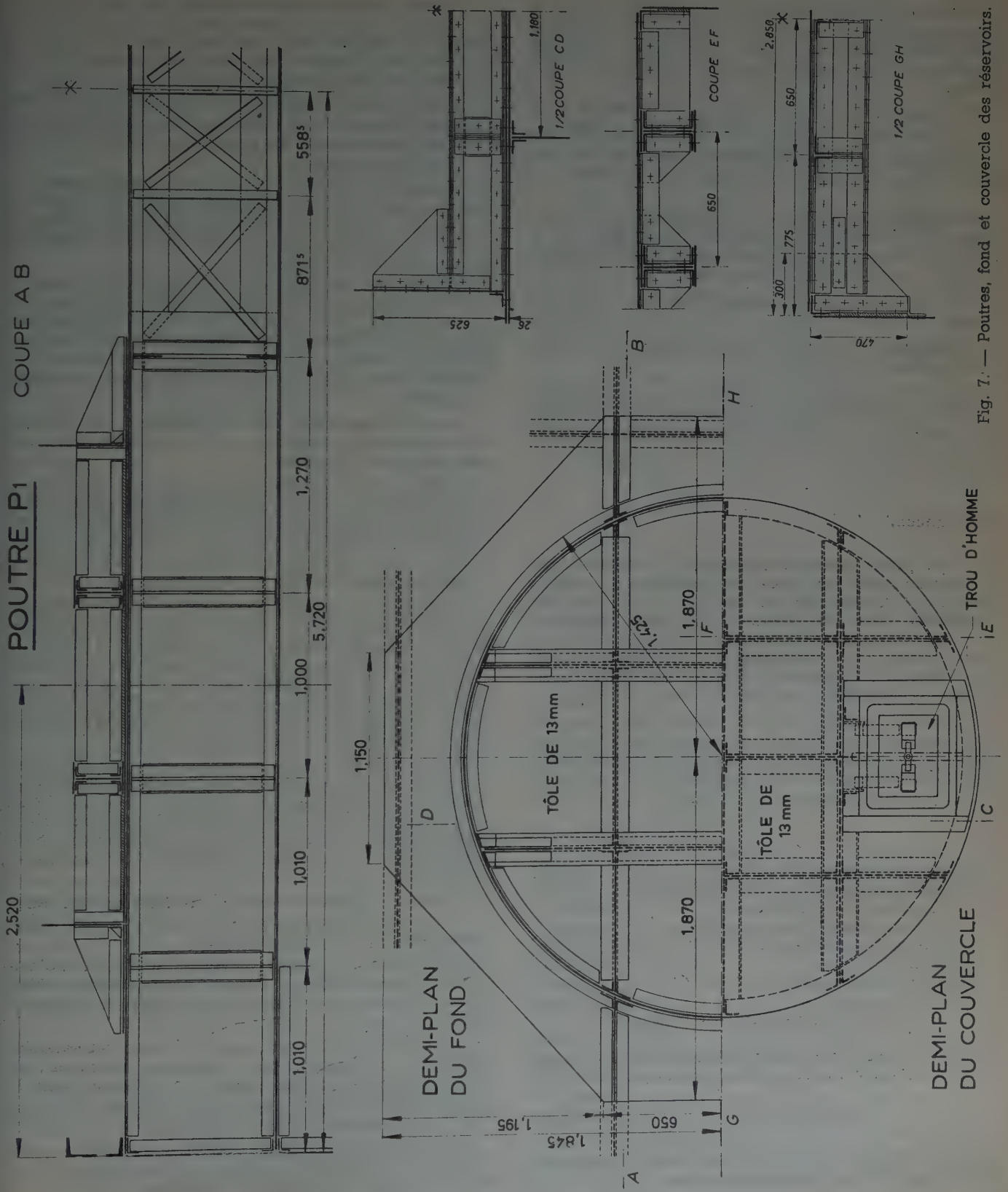


Fig. 7. — Poutres, fond et couvercle des réservoirs.

Le lestage mobile se compose de 110 t de gueuses réparties entre les flotteurs et le platelage de la chambre d'équilibre, et de 42 t de rails placées sur la chambre d'équilibre, le tout, calculé suivant le principe d'Archimède.

Le lestage mobile est aussi assuré par le jeu des eaux ou de l'air dans la chambre d'équilibre et les flotteurs.

La chambre de travail, suivant qu'elle est vide ou pleine d'eau, concourt à la manœuvre de flottaison.

**Plate-forme de travail.** — La plate-forme de travail déborde le rectangle en plan de l'estacade; elle a 12,50 m x 11,50 m, entourée d'une rambarde formant barrière garde-corps de protection.

Elle repose sur quatre fers en U de 11,64 m de longueur.

Le plancher est constitué par des solives de 23/8 et d'un platelage, le tout en bois.

Plusieurs trappes sont prévues afin de descendre, soit dans les flotteurs, soit à l'intérieur de l'estacade métallique pour les services des manœuvres, et aussi pour le logement des appareils de manœuvre des vannes, robinets, etc...

## Cheminées.

Il a été prévu quatre cheminées de 1 m de diamètre, en tôles de 7 mm, dont deux pour desservir la chambre de travail où sont adaptés des sas à air comprimé Fives-Lille; une pour desservir la même chambre, mais avec seulement un sas dit « de visite », servant pour l'entrée et la sortie dans la chambre de travail du personnel de maîtrise, et une, pour desservir la chambre d'équilibre aux fins de réparations, etc...

Ce caisson, dont le prix est très élevé en raison de celui des aciers et de la main-d'œuvre, sera, j'en suis sûr, utilisé à d'autres travaux similaires exécutés à l'air comprimé dans le port de Brest ou ailleurs.

C'est un outil sérieux dont le poids est de :

	kg
Caisson proprement dit.....	94 536
Ossature métallique au-dessus du caisson.....	21 291
Quatre réservoirs d'équilibre.....	60 022
Quatre amorces de cheminée de 1 m.....	2 368
Tronçons de cheminées de 1 m.....	16 258
Deux sas de visite.....	1 945
Deux écluses à béton.....	1 830
Portes et clapets.....	829
Commande de vannes-manilles d'amarrage.....	1 324
Supports des réservoirs auxiliaires.....	5 239
Deux sas de travail Fives-Lille, équipés...	6 380
Soit environ.....	212 022

plus 145 t de lest libre dont le total est pris en considération pour le lest mobile nécessaire.

Chacune des cheminées possédant un sas de travail Fives-Lille, est munie, à poste fixe, d'une pipe à béton, autrement dit d'un sas dénommé « Sas Mortier » du nom de son inventeur, M. Mortier, entrepreneur, et construit par les Ateliers Fives-Lille.

Ce sas permet d'envoyer dans la chambre de travail le béton nécessaire à la confection des socles des caissons et, quelquefois, une certaine partie du matériel et quelques matériaux.

Deux pontons, qui suivent dans ses déplacements le caisson mobile, ont été aménagés, l'un : en usine de production d'air comprimé et de courant électrique, où sont installés des compresseurs d'air et des génératrices d'électricité (photo 4).

Il aurait été peu pratique de mettre cette usine à terre, trop éloignée qu'elle aurait été de l'utilisation de sa production, tout d'abord, parce que l'installation aurait été défectueuse pour l'amenée de l'air et du courant, mais, ensuite, pour la commande des manœuvres diverses nécessaires au fonctionnement des appareils du caisson.

Il était indispensable que le personnel de maîtrise ait constamment sous les yeux cette usine, qui doit faire corps avec le caisson.

L'autre ponton (photo 4) est aménagé en atelier de fabrication du béton, du mortier, ou préparation des matériaux nécessaires à l'exécution des socles. Ce béton est élevé sur la plate-forme par une grue et ensuite amené devant le sas Mortier pour être éclusé et envoyé dans la chambre de travail.

Il ne fallait pas songer à utiliser la plate-forme pour y installer ces ateliers, la place étant trop exiguë. Ils auraient été gênants pour les manœuvres à faire et, aussi, pour l'entrée et la sortie des ouvriers tubistes, l'installation de leurs baraquements et la recette des déblais provenant de la chambre de travail et leur enlèvement. Il en est de même pour la recette et l'introduction des bétons dans les sas Mortier.

Chaque réservoir-flotteur est muni d'un appareil provenant de la maison Corset dit « jaugeur pneumatique à mercure » permettant de connaître les hauteurs d'eau et, partant, la charge de lest d'eau à expurger ou à introduire pour lester ou délester le caisson du poids nécessaire aux diverses manœuvres de flottaison, d'immersion, etc...

Il avait été prévu, au début, une flûte de Pan, mais on y a renoncé, en raison du manque de tuyautages nécessaires et de robinets-sifflets.

On pouvait, à tout instant, observer les hauteurs d'eau dans les réservoirs en ouvrant les robinets à sifflet, car les tuyaux de la flûte étaient réglés de mètre en mètre.

Les sas Fives-Lille sont munis de manomètres enregistreurs de pression, pour permettre de savoir, en l'enregistreur, à chaque instant, la pression dans la chambre de travail, et aussi, pour prévenir tous accidents de surpression dans cette dernière.

Ces appareils permettent également d'éviter toutes discussions avec les ouvriers sur la pression, surtout à cause des marées, pour les salaires.

### Surpression dans la chambre de travail.

Les surpressions, qui pourraient se produire à l'intérieur de la chambre de travail et provoquer, éventuellement, des coups de renard dangereux, sont combattues par l'installation de renards dits « artificiels ».

Ce sont des tuyaux armés de vannes ou robinets qu'on ouvre et qu'on ferme à volonté pour laisser échapper l'air.

Ils débouchent à l'extérieur du caisson et à l'air libre, et l'orifice le plus bas se trouve placé à quelques centimètres (entre 5 et 10) au-dessus de la ligne génératrice des couteaux.

D'autre part, les chefs de postes décèlent facilement s'il y a surpression et règlent les vannes à la demande, ayant leur manomètre portatif de poche sur eux.

De ce fait, il ne peut y avoir de surpression à l'intérieur et augmentation de pression sur le plafond de la chambre, ce qui résout le problème d'une prépondérance de lest, qui devient inutile et prévient tous accidents dus aux coups de renard.

### Siphons.

Des siphons sont aussi installés pour pouvoir, si nécessaire, évacuer les vases sans utiliser les sas, mais, aussi, pour concourir à la manœuvre du caisson par lâchures étudiées.

Cas de Benouville où des lâchures ont été faites et donnant des descentes de caisson de 1 m à 1,25 m en 3 mn.

Sur les figures 1 et 2, coupes horizontales, on remarque l'emplacement des quatre réservoirs-flotteurs, qui sont dénommés : A, B, C et D.

L'idée première était de munir le caisson de six réservoirs-flotteurs en deux rangs de trois chacun, mais, comme déjà dit, la pénurie de métal a obligé de supprimer deux de ces six réservoirs et cette disposition a nécessité l'utilisation de la chambre d'équilibre qui a été logée entre les poutres en treillis.

Cette disposition a rendu les manœuvres du caisson un peu plus compliquées, comme nous allons le voir.

Sur ces mêmes figures, on remarque également les quatre cheminées dénommées : I, II, III et IV.

La cheminée III correspond uniquement avec la chambre d'équilibre tandis que les trois autres I, II et IV traversent entièrement la chambre d'équilibre pour communiquer directement avec la chambre de travail.

Ces trois cheminées seront tamponnées, à leur partie inférieure, pendant les manœuvres de flottaison et de mise en place.

Ci-après, nous allons voir l'exposé concernant les stades de construction, les essais, les manœuvres, la flottaison et la mise en place de l'appareil.

- 1° La construction en cale sèche ;
- 2° L'achèvement sur la banquette ;

3° La mise à flot ;

4° L'échouage du caisson à son emplacement de travail ;

5° Remontée et déplacement du caisson.

### CONSTRUCTION EN CALE SÈCHE

Les conditions locales ont obligé — comme déjà dit — l'exécution de l'appareil en deux phases.

La première dans une cale sèche, et la deuxième sur une banquette à la cote (— 7 m).

Dans la cale sèche, l'appareil a été construit partiellement jusqu'à 15,50 m de hauteur au-dessus du couteau de la chambre de travail.

La hauteur limitée de la cale sèche n'a seulement permis que cette exécution partielle.

La partie ainsi achevée en premier lieu, comprend :

- 1° la chambre de travail ;
- 2° la chambre d'équilibre ;
- 3° les réservoirs-flotteurs sur une hauteur de 10,50 m ;
- 4° la charpente métallique jusqu'à 10,50 m de hauteur, soit trois étages ;
- 5° les cheminées jusqu'à 13,50 m.

Cette partie du caisson constitue, néanmoins, un ensemble flottant qu'il était possible de faire sortir de la cale et d'amener par mer, sur un fond préalablement choisi et de l'y échouer pour son achèvement à toute hauteur.

Avant la sortie, on a fait dans ce stade de construction, le béton de lestage, aussi bien dans la chambre d'équilibre que dans le fond des réservoirs-flotteurs.

On a chargé également les banquettes de lestage dans les crinolines de la chambre de travail avec des gueuses en fonte (96 t environ).

Ces charges assurent la parfaite stabilité de l'appareil au moment de la sortie.

Avant la sortie du caisson on a profité, encore, en cale sèche, pour procéder à divers essais d'étanchéité.

Ces essais ont été les suivants :

- 1° essais des réservoirs-flotteurs à l'eau ;
- 2° essais de la chambre de travail à l'air comprimé ;
- 3° essais de la chambre d'équilibre à l'eau et à l'air comprimé.

Et ils comportent les opérations suivantes :

**Essais des réservoirs-flotteurs :** mise en eau sur 4 m de hauteur ;

**Essais de la chambre de travail :** mise en eau de la chambre de travail, de la chambre d'équilibre, de la cale sèche à hauteur du platelage supérieur de la chambre d'équilibre et envoi de l'air comprimé dans la chambre de travail ;

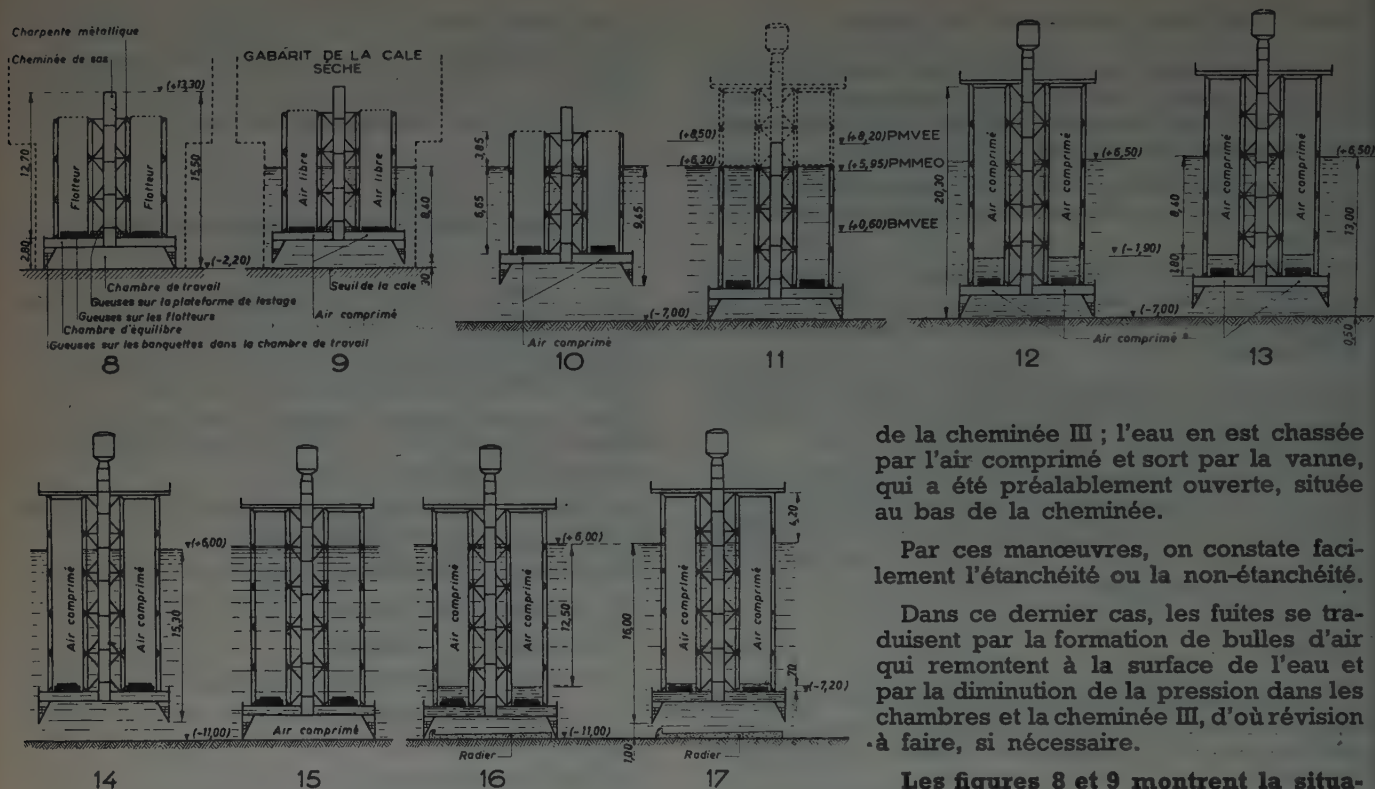


Fig. 8 à 17.

**Essais de la chambre d'équilibre :** après les essais précédents on a remis la chambre de travail en eau et envoyé l'air comprimé dans la chambre d'équilibre, en en chassant l'eau.

Pour ces essais, il est à noter que les cheminées I, II et IV ont été tamponnées, à leur partie inférieure, tandis que la cheminée III qui, seule, communique avec la chambre d'équilibre, a été tamponnée à la partie supérieure.

Pendant la mise en eau de la chambre de travail, on a eu soin de prévoir un robinet pour permettre à l'air atmosphérique contenu dans la chambre de s'en échapper au fur et à mesure que l'eau entre dans cette dernière.

Pour le remplissage de la chambre d'équilibre, l'eau entre dans celle-ci par une vanne placée en bas de la cheminée III et l'air en est chassé par un robinet placé sur le tampon provisoire en haut de la cheminée III (même jeu que ci-dessus).

Pour mettre ensuite la chambre de travail en pression, on a branché une conduite d'arrivée d'air comprimé au robinet d'air du tampon de la cheminée I et l'air entrant dans la chambre de travail, l'eau en est chassée par-dessous le couteau du caisson, comme pour un travail de caisson ordinaire.

Pour faire enfin la vidange de la chambre d'équilibre, on a envoyé l'air comprimé par le robinet du tampon

de la cheminée III ; l'eau en est chassée par l'air comprimé et sort par la vanne, qui a été préalablement ouverte, située au bas de la cheminée.

Par ces manœuvres, on constate facilement l'étanchéité ou la non-étanchéité.

Dans ce dernier cas, les fuites se traduisent par la formation de bulles d'air qui remontent à la surface de l'eau et par la diminution de la pression dans les chambres et la cheminée III, d'où révision à faire, si nécessaire.

Les figures 8 et 9 montrent la situation du caisson dans la cale sèche.

Sur la figure 8, on voit la partie de la construction métallique exécutée dans le premier stade (à remarquer les lestages).

Sur la figure 9, on voit le caisson qui flotte et prêt à sortir de la cale sèche.

On a procédé à la sortie du caisson de la cale aussitôt que le montage de la partie inférieure a été achevé et les essais terminés avec succès.

En vue de cette sortie, il a fallu, tout d'abord, vidanger l'eau des réservoirs pour permettre à l'appareil de flotter, la chambre d'équilibre étant déjà vide d'eau à la suite des essais d'étanchéité.

On a fait ensuite entrer l'eau dans la cale sèche (à hauteur du tirant d'eau du caisson). Cette eau a rempli la chambre d'équilibre afin d'éviter que celle-ci ne subisse une pression extérieure trop importante, mais, lorsque, par la suite, le niveau extérieur arrivera à environ 7,50 m, on chassera cette eau au moyen de l'air comprimé. Les parois de la chambre subiront alors, de part et d'autre, des pressions égales qui s'annuleront. Le caisson pourra flotter.

Le niveau d'eau de la cale augmentera avec la marée et quand celle-ci sera arrivée à environ 6 m les couteaux du caisson se trouveront bien au-dessus du seuil et on pourra le faire sortir et le remorquer jusqu'à la banquette prévue pour son achèvement.

Pour toutes ces manœuvres de sortie et de remorquage, un bateau, équipé avec compresseurs d'air, était accouplé au caisson mobile.

## ACHÈVEMENT SUR LA BANQUETTE A (— 7 m)

Venant de la cale sèche des sous-marins, le caisson est amené sur la banquetta d'achèvement à (— 7 m) où la hauteur verticale n'est pas limitée en vue de pouvoir y terminer complètement la superstructure, c'est-à-dire, aussi bien la partie supérieure des réservoirs-flotteurs que la partie restante de la charpente métallique et la plate-forme du travail (fig. 4).

Au moment de la haute mer, l'appareil est amené au-dessus de la banquetta pour y être échoué.

Le lest d'eau étant insuffisant, le caisson sera chargé, à ce moment, de 50 t environ de gueuses de fonte dans le fond des flotteurs vides d'eau. Son tirant d'eau passera alors à environ 10,20 m et il pourra s'échouer lorsque la mer baissera à + 3,20 m environ.

Pour lui donner un poids suffisant, il sera encore lesté par l'introduction d'eau dans les flotteurs.

Les figures 10 et 11 donnent la situation du caisson sur la banquetta.

Sur la figure 10, on voit le caisson flottant à la haute mer. Les réservoirs sont encore vides. On a commencé la charge avec des gueuses dans les réservoirs.

Sur la figure 11, on voit l'appareil échoué et les réservoirs remplis d'eau. Cette position du caisson permet l'achèvement de la partie tracée en pointillée.

Pendant le temps que le caisson devra rester à cet emplacement, il faudra que les flotteurs et la cheminée d'équilibre III puissent ni le charger exagérément, ni le laisser se soulever ; à cet effet, l'eau qu'ils contiennent devra pouvoir suivre les variations dues aux marées et, dans ce but, les réservoirs seront mis en communication avec la mer, par les vannes inférieures.

La répartition des gueuses dans les quatre flotteurs A, B, C et D a été faite de façon à compenser les petites dissymétries de la construction du caisson, pour éviter toute inclinaison possible pendant sa flottaison.

Pendant la pose des gueuses, le tirant d'eau du caisson — non achevé — va en augmentant jusqu'à environ 10,20 m. De ce fait, il a été nécessaire d'augmenter, en même temps, la pression de l'air comprimé contenu dans la chambre d'équilibre et dans la cheminée en y envoyant de l'air comprimé.

Quand la marée descend et atteint la cote (+ 3,20 m), le couteau du caisson est à la cote (10,20 m — 3,20 m = — 7 m) et touchera ainsi la banquetta préparée sur laquelle l'appareil doit reposer pendant l'achèvement de sa construction.

Après l'échouage, on a ouvert le robinet d'air comprimé du tampon provisoire de la cheminée III.

L'air comprimé contenu dans la chambre d'équilibre et dans la cheminée s'est échappé par ce robinet et l'eau y est entrée par la vanne de cette même cheminée, commandée par tige de manœuvre.

Ensuite, les vannes d'eau des quatre grands réservoirs A, B, C et D resteront ouvertes de manière à ce que l'eau, à l'intérieur de ces réservoirs, puisse suivre les variations de la mer.

Dans cette position, l'appareil est resté lesté sur le

fond à (— 7 m) jusqu'à l'achèvement des opérations de montage de toute la partie supérieure.

## MISE A FLOT

Dès l'achèvement sur la banquetta à (— 7 m), on a procédé à la mise à flot du caisson.

Pour cela faire, il a été nécessaire de le délester en vidangeant l'eau des flotteurs et de la chambre d'équilibre.

Cette vidange a été faite par l'air comprimé.

**Fermeture des vannes et envoi d'air comprimé.**

Quand le niveau de la mer a atteint la cote (+ 5,31 m) à marée montante, on a fermé les vannes d'échappement d'air et on a ouvert les vannes d'arrivée d'air comprimé des quatre flotteurs A, B, C et D et de la cheminée III.

L'eau chassée par l'air comprimé a été évacuée par les vannes d'eau des réservoirs, ouvertes.

L'admission d'air doit être graduelle pour éviter toute surpression à l'intérieur des flotteurs.

Quand les flotteurs, la cheminée III et la chambre d'équilibre sont vides d'eau et que la mer atteint environ la cote (+ 5,31 m), la hauteur d'eau au-dessus du couteau du caisson est de 7 m + 5,31 = 12,31 m, valeur égale au tirant d'eau du caisson terminé. On a eu soin de fermer les vannes d'eau.

Celui-ci peut alors commencer à flotter et ne repose plus sur la banquetta.

L'appareil est chargé pour être parfaitement stable.

Le métacentre se trouvera à une distance de 0,75 cm au-dessus du centre de gravité.

Quand le niveau de la mer atteint la cote de (+ 6,50 m) environ, le caisson est suffisamment dégagé pour qu'on puisse procéder à son transport jusqu'à son emplacement du lieu du travail.

Pendant la flottaison du caisson, il faut maintenir constamment la pression de l'air comprimé dans les flotteurs et dans la chambre d'équilibre.

Les figures 12 et 13 donnent les détails de la mise à flot.

Sur la figure 12, on remarque l'introduction partielle de l'air comprimé dans les réservoirs-flotteurs et dans la chambre d'équilibre.

Sur la figure 13, le caisson achevé commence à flotter.

## ÉCHOUAGE DU CAISSON

A la marée haute, le caisson est remorqué à son premier emplacement de travail du mur de quai à construire. On lui ajoute un lest complémentaire de 15 t environ de gueuses, afin d'augmenter son tirant d'eau et lui permettre de reposer sur le fond à (— 11 m) quand la marée aura baissé jusqu'à (+ 1,83 m).

A ce moment, les flotteurs et la chambre d'équilibre sont remplis d'eau à la hauteur du niveau de la mer pour augmenter le poids de l'appareil et le conserver échoué à haute mer.

Les flotteurs resteront en communication avec la mer afin que les niveaux d'eau, intérieur et extérieur, soient les mêmes à tous moments.

Avant le remorquage du caisson à son emplacement du lieu de travail, il faut que le fond soit, préalablement, dragué à la cote ( $- 11$  m) environ.

Le lestage supplémentaire du caisson avec les 15 t de gueuses sera fait sur les couvercles des flotteurs et la répartition de ces 15 t de gueuses permettra encore de compenser exactement les légères dissymétries de construction du caisson, si elles existent.

Pendant toute la durée de l'échouage on laisse sortir l'air comprimé contenu dans les flotteurs et la chambre d'équilibre par les vannes d'échappement, en gardant les vannes d'eau ouvertes.

Le caisson, échoué à son emplacement de travail, le lest mobile est complété par 45 t de gueuses réparties sur le platelage de la chambre d'équilibre et six paquets de rails pesant 7 t chacun, soit un total de 42 t de rails sur les tablettes de la chambre d'équilibre.

L'appareil est alors prêt à être utilisé.

On commencera par vidanger l'eau de la chambre de travail et les opérations ordinaires, devant être faites à l'air comprimé, pourront suivre.

L'air comprimé pour la chambre de travail arrivera par les cheminées I, II et IV.

Ces trois cheminées ont été tamponnées, provisoirement, à leur partie inférieure, pendant la flottaison.

Aussitôt que la pression de l'air comprimé contenu dans les cheminées fera équilibre à celle de l'eau de la chambre, on ouvrira les robinets d'air se trouvant sur les tampons des cheminées.

L'air comprimé videra alors la chambre et on pourra commencer à travailler.

Les figures 14 et 15 montrent la position de l'appareil pendant l'échouage.

Sur la figure 14, on voit le caisson flottant encore, avec l'air comprimé dans les réservoirs-flotteurs.

Sur la figure 15, on voit l'échouage terminé et l'air comprimé dans la chambre de travail.

## REMONTÉE ET DÉPLACEMENT DU CAISSON

Quand l'exécution à l'air comprimé d'un socle de fondation sera terminée, l'appareil sera remis à flot pour être conduit à un nouvel emplacement de travail.

Pour la remise à flot, on opérera à basse mer.

La chambre de travail sera d'abord remplie d'eau et ensuite les flotteurs et la cheminée d'équilibre seront — au contraire — vidangés d'eau.

Le caisson, ainsi allégé, et ramené à son tirant d'eau de 16 m environ, sera soulevé par la mer quand celle-ci atteindra la cote de ( $+ 5$  m) environ.

La mer, continuant à monter, le couteau sera dégagé des fondations, quand la marée sera à la cote ( $+ 6$  m) environ.

Le caisson pourra alors être remorqué à l'emplacement du travail suivant, où les opérations déjà décrites d'échouage seront répétées.

Les figures 16 et 17 illustrent les opérations de remontée et de déplacement.

Sur la figure 16, on voit l'introduction de l'air comprimé dans les flotteurs, la chambre de travail pleine d'eau et le caisson prêt à remonter.

Sur la figure 17, on voit le caisson soulevé à la marée ( $+ 6$  m) et avec un tirant d'eau de 16 m environ. Le caisson est dégagé de la fondation achevée et prêt à être remorqué à un nouvel emplacement.

## MISE EN PLACE, RÉGLAGE DU CAISSON

La position du caisson est repérée par deux alignements, l'un transversal, l'autre longitudinal, matérialisés sur le caisson par quatre pinnules placées sur les supports des caisses à eau, pour lestage éventuel, lesquels sont rigidement fixés aux flotteurs. Les opérations se font par visées directes, grâce aux pinnules (fig. 18).

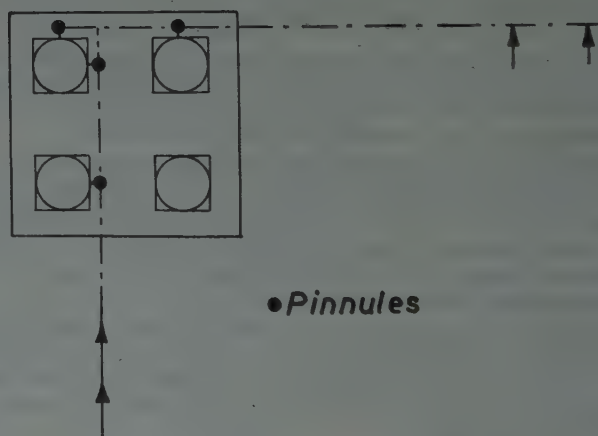


Fig. 18. — Emplacement des pinnules.

Le déplacement du caisson se fait à l'aide de cinq treuils dont deux sont placés sur la plate-forme supérieure du caisson et pris sur des corps morts mouillés en mer ou à terre ; deux placés à terre et un sur une jetée (fig. 19).

Les treuils du caisson fixent la distance longitudinale, le treuil sur la jetée fixe la position transversale, les deux treuils à terre servent à l'orientation du caisson.

Le caisson ayant été avancé légèrement sur l'avant de sa nouvelle position, un scaphandrier descend pour s'assurer de sa position.

A son signal, si tout va comme il faut, le caisson est descendu doucement jusqu'à ce que le couteau soit légèrement plus bas que le radier précédent, par admission d'eau dans les deux flotteurs et cela, en diagonale...

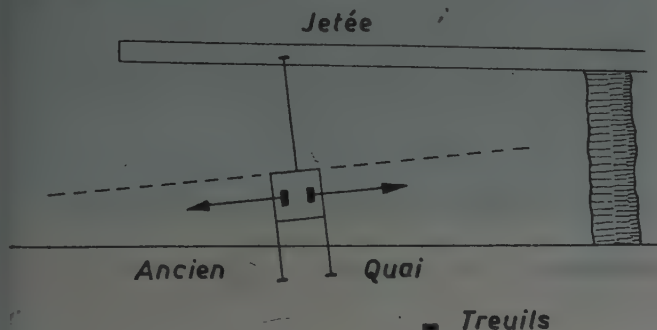


Fig. 19. — Emplacement des treuils.

A ce moment, le caisson est reculé de façon à venir s'appliquer contre le radier, puis échoué par remplissage des flotteurs, dans un ordre qui favorisera le redressement, s'il y a lieu.

La chambre d'équilibre est purgée en dernier lieu.

Il va sans dire que le chaland servant d'usine de compression suit, en couple, le caisson, pour pouvoir raccorder les tuyauteries d'air comprimé et lignes électriques.

La durée de déplacement, mise en place, réglage et échouage est de l'ordre de 30 à 45 mn, sans compter le temps des vidanges, soit 2 h à 2 h 30, en raison, je dirais presque, de l'automatisme des manœuvres.

Il est évident qu'on choisit, pour exécuter ces dernières, les heures propices des marées.

Le nombre d'ouvriers, spécialement affectés au caisson, a été de 16 ouvriers tubistes dans le fond, au moment de grande presse, mais, normalement, les postes se composent :

**A l'intérieur** de 1 chef de poste, 10 à 12 tubistes, 2 gaineurs-treuilistes ;

**A l'extérieur** de 1 chef de pile, 5 à 6 manœuvres.

Il a été fait, jusqu'à présent, vingt socles de fondation avec le caisson mobile auto-flotteur, soit une longueur de 195 m environ.

C'est-à-dire que la fondation est en avant, de beaucoup, sur le quai proprement dit, les caissons en béton armé étant plus longs à construire et à mettre en œuvre, et aussi, par manque de ciment.

La haute direction de ces travaux est assurée à Paris, pour la Marine nationale, par :

M. Guy, Directeur, Ingénieur en chef des Travaux maritimes, notre Président de séance ;

M. Estrade, Sous-Directeur, Ingénieur en chef des Travaux maritimes ;

M. Pavin, Ingénieur en chef hors-classe des E. M.

Et sur place, pour la Marine Nationale, à Brest, par :

M. Cayotte, Ingénieur en chef hors cadre des Travaux de la Marine ;

M. Croquet, Ingénieur, son adjoint ;

M. Geoffard, Ingénieur de Direction des Travaux.

**Pour l'entreprise, par :**

MM. Chauffour-Dumez, Pierre et André, de l'Entreprise Dumez, à Paris ;

M. Mouillé, pour l'Entreprise Dodin, à Nantes ;

M. Bordes, Ingénieur en chef à Paris de l'Entreprise Dumez ;

M. Bénit, représentant la Participation, pour l'ensemble des travaux, à Brest ;

M. Vuillet, ex-Lieutenant de vaisseau, Commandant de sous-marin, chargé spécialement des travaux à l'air comprimé et manœuvres marines ;

MM. Bosi et Cognard, chefs de piles des travaux à l'air comprimé.

Cette conférence est faite d'accord et avec l'autorisation de la Marine et des Entreprises Dumez et Dodin, dont je suis l'Ingénieur-Conseil. Je ne veux pas laisser passer l'occasion de remercier tous mes collaborateurs directs de la Société Générale d'Études Jacques CAMBON et Cie, de leur concours précieux.

Je remercie ensuite M. KELLER, de l'Institut Technique, et M. TRUCHOT, qui m'ont aidé à l'arrangement et aux projections.

Veuillez me permettre, Monsieur le Président, de vous remercier et vous, Messieurs, d'avoir bien voulu prêter une oreille attentive au modeste exposé, un peu aride, que je viens d'avoir l'honneur de vous faire, mais qui intéresse notre reconstruction.

Nous devons, vieux et jeunes, lutter d'arrache-pied pour reconstruire la France éternelle, en appliquant la maxime : « Labor improbus omnia vincit ».

CONCLUSION DU PRÉSIDENT

Mesdames, Messieurs, je voudrais remercier M. CAMBON à un double titre.

Tout d'abord, je crois être votre fidèle interprète en le félicitant, en votre nom à tous, pour le brillant exposé, si précis et si documenté, si complet, qu'il vient de faire devant vous.

En second lieu, au nom de la Marine Nationale, puisque grâce à M. CAMBON, la Marine Nationale possède maintenant, à Brest, un magnifique outil de travail qui sera, je l'espère, un des éléments essentiels de la rénovation de notre grande base navale.

TABLE DES MATIÈRES

	Pages.		Pages.
Allocution du Président. Réponse de M. CAMBON.....	2	Siphons .....	13
Exposé de M. CAMBON .....	3	Construction en cale sèche .....	13
Caisson auto-flotteur.....	6	Achèvement sur la banquette à (— 7 m).....	15
Dispositions générales .....	6	Mise à flot .....	15
Poutraison .....	7	Échouage du caisson à l'emplacement du lieu de travail .....	15
Bordé et consoles .....	8	Remontée et déplacement du caisson.....	16
Plafond .....	10	Mise en place et réglage du caisson.....	16
Charpente métallique formant estacades.....	10	Conclusion du Président.....	18
Réservoirs flotteurs.....	10	Table des Matières.....	18
Cheminées.....	12		
Suppression dans la chambre de travail .....	13		



Photo 1. — **Vue générale du caisson mobile.**



Photo 2. — **Caisson mobile de Missiessy.**



Photo 3. — **Remorquage d'un caisson en béton armé.**

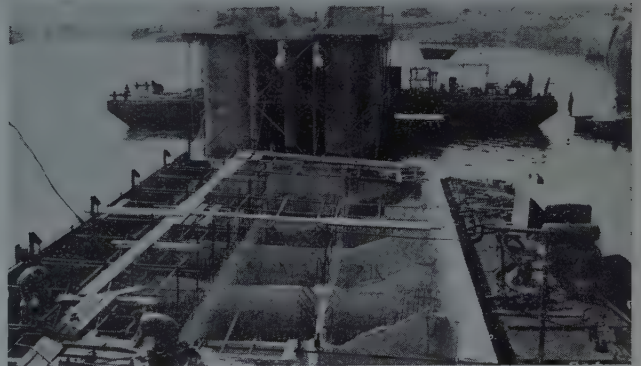


Photo 4. — **Caisson mobile avec ses pontons-ateliers.**



Photo 5. — **Caisson mobile et passerelle reliant l'ancien quai et la plate-forme de travail.**



Photo 6. — **Caisson mobile et passerelle reliant l'ancien quai et la plate-forme de travail.**



Photo 7. — **Achèvement du caisson  
sur la banquette à la cote (— 7 m).**



Photo 8. — **Échelles d'accès  
au plancher supérieur.**

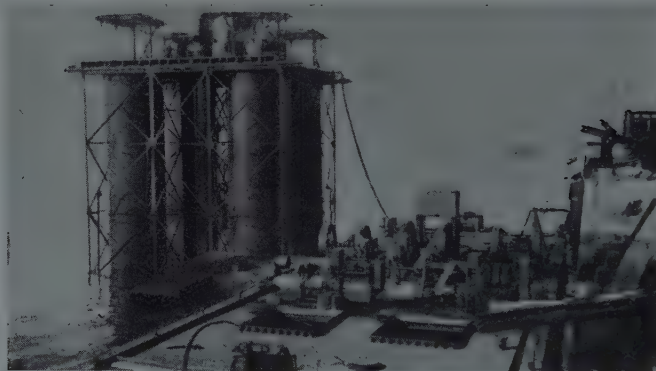


Photo 10. — **Vue d'un chaland portant les compresseurs.**



Photo 9. — **Vue des réservoirs-flotteurs  
et d'un sas à matériaux.**



Photo 11. — **Caisson  
en cours de terminaison.**

## ÉQUIPEMENT TECHNIQUE, N° 1

CENTRE D'ÉTUDES SUPÉRIEURES

EXPOSÉ DU 2 DÉCEMBRE 1947

### BISTRE, SUIE ET CALCIN ;

de leur production, de leurs inconvénients et des moyens  
pour les éviter et en réparer les dégâts

Par **M. Constant HERODY**, Ingénieur des Arts et Manufactures,

Président honoraire de la Chambre Syndicale des Entreprises d'Installations thermiques,  
Président Fondateur honoraire de l'Union des Chambres Syndicales du Chauffage de France,  
Expert des Tribunaux.

#### SOMMAIRE :

	Pages.		Pages.
<b>Bistre</b> .....	5	<b>Suie</b> .....	16
Examen des appareils .....	7	<b>Calcin</b> .....	17
Examen des combustibles .....	8	<b>Construction des conduits de fumée nouveaux</b> .....	20
Appareils spéciaux .....	15		
Comment réparer les dégâts .....	15		

*Reproduction interdite.*

## EXPOSÉ DE M. HERODY

Devant le besoin, « nécessité fait loi », et chacun se débrouille comme il peut en se servant au mieux pour lui de ce qu'il a sous la main, sans se préoccuper généralement de ce qui pourra s'ensuivre, tant pour les autres que pour lui-même.

Inutile de vous dire que cette façon de faire conduit souvent par la suite à de profonds ennuis dont personne n'entend encourir la responsabilité, les coupables objectant qu'il n'y a pas eu faute de leur part, ou bien qu'étant donné les circonstances et ce qui était mis à leur disposition, il leur était impossible de faire autrement.

C'est ainsi qu'en ce qui concerne le chauffage, chacun d'entre nous a été amené à faire « flèche de tout bois » pour arriver, tant bien que mal, à avoir tout au moins dans une partie de ses locaux une ambiance lui permettant d'y vivre; chacun a cherché à utiliser le combustible qui pourrait procurer le maximum de rendement calorifique sans penser aux conséquences qui pourraient en découler; il en est résulté de nombreux inconvénients, car les conduits de fumée avaient été établis pour des foyers différents de ceux que nécessitent les combustibles utilisés à l'heure actuelle.

Tout foyer doit être raccordé à un conduit de fumée pour évacuer à l'extérieur les produits de la combustion, sous peine de danger d'intoxication grave (*les braseros déversant ceux-ci dans le local même où ils se trouvent ne peuvent être utilisés qu'à l'extérieur ou dans de grands vaisseaux, tel que le Hall du Grand-Palais où le volume et la hauteur sont tels que les produits peuvent y être déversés pratiquement sans aucun inconvénient*).

Pour tous les autres locaux normaux d'habitation ou de travail, il est indispensable que les appareils de chauffage, de quelque nature qu'ils soient et quels que soient les combustibles utilisés, puissent évacuer directement à l'extérieur les gaz odorants et nocifs qu'ils produisent.

De ce fait, chacun est amené à rechercher le moyen d'assurer cette évacuation. La plupart ignorent ce que doit être un conduit de fumée et ne se soucient pas des conséquences d'une telle installation, tant pour eux-mêmes que pour les voisins. Ils utilisent n'importe quoi comme conduit de fumée; il en résulte de sérieux déboires.

Un trou dans le toit, dans le plafond, ou dans le mur, n'est-ce pas suffisant pour le but que l'on se propose ? Et le trou est utilisé sans se préoccuper de savoir ni où il aboutit ni si une installation pratiquée dans de telles conditions ne risque pas d'être susceptible d'un incendie, d'une gêne ou d'un danger pour les voisins, de dégâts pour l'immeuble, voire de l'impossibilité de fonctionnement du foyer que l'on désire installer.

C'est ainsi que l'on voit tous les jours des tuyaux sortant par le carreau d'une fenêtre ou à travers des cloisons en planches, des appareils branchés dans des coffres n'ayant aucun débouché à l'extérieur, dans des gaines aboutissant à des greniers, dans des ventilations, dans des chutes de water-closet et dans des descentes d'eaux pluviales, toutes choses dangereuses et interdites.

Et il en est de même de l'installation des poêles dans les locaux; très souvent tout est fait de fortune, sans prendre les précautions les plus élémentaires (*appareils en mauvais état placés n'importe où, n'importe comment, sur n'importe quel sol, à proximité de n'importe quelle cloison ou de n'importe quel objet combustible, montés avec des tuyaux invraisemblables tant comme parcours que comme matériau, et le tout branché dans des conduits effarants*).

Mais le vendeur, marchand de bric-à-brac ou employé de bazar, 15 jours avant employé au rayon des chaufferettes, n'a-t-il pas lui-même certifié que l'appareil fonctionnerait n'importe où, et pour vendre le poêle et quelques accessoires de plus le cas échéant, n'a-t-il pas poussé à passer outre à toute réglementation en vigueur (*que du reste il ignore*), pour l'installation de l'appareil dont il était question de faire l'acquisition ?

Pour cet employé qu'est-ce que peuvent bien être les courbes caractéristiques d'un appareil d'où découlent les possibilités d'emploi rationnel de celui-ci ? Un appareil de chauffage n'est-il pas comme tout ce qui se trouve dans la boutique ou le rayon, un objet qu'il faut vendre au mieux de ses intérêts propres et de ceux du patron, sans se soucier de ce qui pourra en résulter pour l'acheteur ? N'est-ce pas, après tout, à ce dernier de savoir ce qu'il veut, ce qu'il lui faut, et de voir si ce qui lui est offert lui convient ou non ?

Naturellement cette façon de faire n'est pas sans inconvénients, elle peut être cause de désastres, et ce ne sont pas les quelques condamnations prononcées par les tribunaux, aussi sévères qu'elles puissent être, qui remettront les choses en état, tant que la question de la vente des poêles ne sera pas sérieusement réglementée et remise entre les mains de ceux à qui elle doit normalement revenir : les professionnels qualifiés de la fumisterie et du chauffage.

J'ai évidemment mauvaise grâce à parler de cette sorte, et j'ai peu de chance d'être entendu car, étant entrepreneur de fumisterie, fondateur de l'Union des Chambres Syndicales du Chauffage de France, et Président honoraire de la Chambre Syndicale des Entreprises d'Installations Thermiques, on ne manquera pas de me traiter d'orfèvre en la matière et de m'accuser de vouloir tirer la couverture à moi et au bénéfice de ma profession; mais cependant en pareille matière, alors que pour exercer le métier de médecin ou celui de pharmacien il faut avoir des diplômes, et que l'on ne peut être banquier, voire bistrot, sans en avoir l'autorisation, il est anormal que n'importe qui puisse vendre et installer des appareils dangereux sans prouver au préalable qu'il a les connaissances et le savoir indispensables; savoir et connaissances qui poussent celui qui les a à se rendre compte de l'état des lieux et à procéder aux essais indispensables avant de faire l'installation, au lieu de vendre dans un magasin n'importe quel appareil, même si celui-ci est, à priori, de fabrication ridicule ou en état déficient.

La connaissance des lieux où doit être placé l'appareil étant indispensable, il va de soi que l'installation des appareils de chauffage et de cuisine et leur fourniture ne devraient, en principe, être confiées qu'à l'entrepreneur attiré de l'immeuble où ils doivent être installés; cet entrepreneur étant évidemment le mieux qualifié pour exécuter une installation correcte, puisqu'il connaît toutes les particularités de l'immeuble.

La plupart des locataires oublient ou veulent ignorer la nécessité de faire appel à l'entrepreneur de l'immeuble; ils se figurent qu'elle cache une « combine » entre l'entrepreneur et le propriétaire, le gérant ou l'architecte pour lui facturer les travaux plus cher. Imbus de cette idée, ils s'adressent alors à des connaissances non suffisamment averties dont il ne ressort ensuite que des installations déficientes quoique tout aussi onéreuses et l'emploi d'appareils qui tout en étant très bons en eux-mêmes se trouvent placés dans des conditions telles qu'il ne peut qu'en découler un jour ou l'autre les plus graves ennuis.

C'est la raison pour laquelle je vais essayer de montrer combien est délicate et compliquée la bonne utilisation des appareils de chauffage, et pourquoi leur choix et leur installation ne doivent être confiés qu'à des personnes compétentes. Espérant qu'il en résultera un tout autre état d'esprit que celui qui règne actuellement tant parmi les experts, les compagnies d'assurances, les fabricants, les vendeurs d'appareils, les marchands de combustibles et les usagers, que chez les propriétaires et leurs mandataires, les gérants et les architectes et naturellement le public où tout le monde parle de chauffage sans bien savoir au fond de quoi il retourne exactement et où chacun ne voit que ce qui le concerne directement.

A ce point de vue je tiens tout d'abord à bien mettre les choses au point, car si le sujet que je traite devant vous : « les inconvénients du bistre, de la suie et du calcin », a été mis à l'ordre du jour, c'est pour montrer combien sont défectueuses l'utilisation des conduits existants avec les combustibles que l'on trouve en ce moment sur le marché, et la combustion de ces combustibles dans les appareils fabriqués à l'heure actuelle par notre industrie.

Ces appareils à feu fermé, à combustion continue réglable par l'admission de l'air sous le cendrier, appelés couramment « appareils à feu lent », sont en effet totalement différents des appareils à feu ouvert (cheminées) pour lesquels les conduits existants se trouvent avoir été construits. Leurs besoins et leurs exigences ne sont nullement les mêmes et si la plupart du temps leur fonctionnement s'accommode tant bien que mal de la situation dans laquelle ils se trouvent une fois branchés dans ces conduits, il n'en résulte pas moins que tous sont loin d'être dans des conditions vraiment normales et que, dans bien des cas, il en résulte, un jour ou l'autre, des défaillances notoires, des dégâts ou des accidents.

Pour ne pas en avoir la responsabilité, les propriétaires ont cru bien faire d'insérer dans les baux et engagements de location qu'ils souscrivent à leurs locataires la phrase suivante :

« Le preneur s'engage à ne pas se servir d'appareils à feu lent », ou une formule semblable.

Sous cette forme, ils sont loin d'être couverts comme ils le croient, car cette interdiction est loin d'être acceptée par tous les tribunaux, nombreux étant ceux qui estiment,

et avec raison, que tout foyer peut être mené à feu lent (*une cheminée ordinaire à feu ouvert brûlant du bois sur chenêts peut elle-même être menée à feu lent quand on en couvre le combustible de cendre*) et, qu'en conséquence, cette clause est draconienne et ne saurait être admise.

Aussi, pour ma part, tenant compte de ce que les conduits qui existent doivent pouvoir être normalement utilisés tout en empêchant de s'en servir pour d'autres foyers que ceux pour lesquels ils ont été établis, ai-je préconisé à la Chambre Syndicale des Propriétaires de modifier cette formule et de la remplacer par celle-ci :

« Le preneur s'engage à ne pas utiliser les conduits de fumée de l'immeuble pour d'autres appareils que ceux pour lesquels ils ont été établis et qui ont été mis à sa disposition. »

Évidemment, ceci implique que le propriétaire, en plus du conduit de fumée, fournisse à son locataire l'appareil adéquat comme cela était autrefois, où il mettait à la disposition de celui-ci cheminées, poêles de salle à manger, fourneaux de cuisine revus et mis en état lors de l'entrée en jouissance du locataire.

C'est pour le propriétaire une obligation ennuyeuse, mais vraiment la seule qui puisse lui donner une garantie, car ayant mis à la disposition de son locataire les appareils voulus et en concordance avec les conduits de fumée de son immeuble, ce dernier est alors seul indiscutablement responsable s'il se sert d'autres appareils et apporte des modifications à ceux qui ont été mis à sa disposition.

Il en est évidemment tout autrement pour le propriétaire qui, cédant à une économie mal placée en l'occurrence, a de lui-même supprimé ces appareils ou donné à son locataire l'autorisation de les enlever en se contentant de laisser à sa disposition les conduits de fumée, car il ne peut alors honnêtement lui reprocher de les employer avec les appareils courants qui sont pratiquement les seuls qu'actuellement il peut se procurer.

Il ne peut être que mal venu et non suivi dans l'interdiction qu'il peut lui faire de s'en servir.

Je tiens d'autre part à bien préciser cependant qu'en cas d'accidents et de dégâts, le fait de n'avoir que les conduits à sa disposition ne met pas, malgré tout, l'usager complètement hors de cause; car en chaque chose il y a lieu de tenir compte de la façon dont l'accident ou les dégâts se sont produits, de savoir quelles en ont été les causes, et de voir si l'utilisateur n'a pas, sinon toute la responsabilité, tout au moins une partie de celle-ci à sa charge, du fait de ne pas avoir pris les dispositions voulues, dont certaines tombent sous le bon sens, chacun se devant de ne faire usage des objets mis à sa disposition qu'en bon père de famille.

C'est ainsi que la mise à la charge de l'usager de la réparation des conduits de fumée détériorés par un feu de cheminée en cas de non-ramonage de ceux-ci ou quand il n'y a aucun vice de construction, est des plus logiques; et elle se doit d'être étendue au cas du bistre par suite d'utilisation de bois vert, de combustibles d'usage totalement différent de ceux autrefois employés (gaz, huiles lourdes, brande, agglomérés, tourbe, etc.), de même qu'à celui de dégradation du conduit par coups de feu, excès de chaleur, explosion, etc., ou par l'emploi d'appareils non en correspondance avec les possibilités normales du conduit (mécaniques de blanchisseuses, chaudières, foyers indus-

triels, etc.), et surtout lorsque aucune précaution n'a été prise pour qu'il n'en résulte aucun inconvénient, et ceci, à mon avis, même si le propriétaire ne l'a pas spécifié.

Un locataire doit bien se dire qu'il a des obligations et que ce n'est pas une raison parce qu'il paye son terme pour avoir le droit de faire, dans les lieux qu'il occupe, tout ce qui lui passe par la tête et ce, quelles qu'en soient les raisons.

Quand il a loué son local, il est censé avoir pris connaissance de celui-ci et l'avoir pris dans les conditions où il se trouvait, avec les obligations d'utilisation qui en découlaient.

S'il y a dans celui-ci des cheminées et des appareils de chauffage et de cuisine installés, c'est de ceux-ci qu'il a la jouissance et la possibilité de se servir et non d'autres; s'ils ne sont pas en état, il est en droit d'en demander la révision et la remise en ordre; mais s'ils ne lui conviennent pas parce qu'il les trouve insuffisants et non adéquats à ses besoins, et les remplace par d'autres sans l'autorisation du propriétaire, c'est à lui seul alors qu'incombe la responsabilité de tous les inconvénients et dégâts qui peuvent en survenir.

S'il n'y a pas d'appareils de chauffage et de cuisine, mais simplement des conduits de fumée, c'est à lui à ne les utiliser que dans la limite où ceux-ci peuvent l'être et, en particulier, en prenant dans ses installations les précautions voulues pour qu'il n'en découle aucune gêne ni dégradation pour l'immeuble, ni inconvénients pour les voisins. Et pour ce faire, s'il n'a pas lui-même la compétence voulue, de s'adresser à l'homme qualifié pour que les choses soient faites comme il se doit.

Ce long préambule dont je m'excuse a eu surtout pour but de bien situer l'un des côtés de la question sur laquelle il m'avait été demandé de donner tout particulièrement mon avis en qualité de spécialiste et d'expert auprès des tribunaux pour les questions de fumisterie, de chauffage et de ventilation.

Passons maintenant à l'examen du bistre, de la suie et du calcin, dont les problèmes nous tiennent actuellement tout particulièrement à cœur par tous les ennuis qui en découlent, et qui se doivent d'être examinés ensemble, en raison des relations qui existent entre eux, pour trouver la solution finale à laquelle nous sommes intéressés : « La construction de conduits qui nous mettent à l'abri de tout inconvénient. »

Quels sont tout d'abord ces trois éléments qui proviennent tous de la combustion des combustibles ?

Le premier, le *bistre*, sur lequel il y a plus de 30 ans, mon collègue, camarade et grand ami, feu M. MAUBRAS, ingénieur des Arts et Manufactures, s'était déjà penché, est un produit de la distillation des combustibles et plus particulièrement du bois.

C'est au fond l'ensemble de tout ce qui se dégage de ceux-ci, sous forme volatile, sous l'action de la chaleur et se condense ensuite sous l'effet du refroidissement, c'est-à-dire le pyrolygèneux.

Cet ensemble est donc très variable comme composition suivant les combustibles dont il émane.

Il en est de même du *calcin* qui ne se différencie du bistre que par le fait que le calcin est composé des parties

les plus lourdes, les moins solubles et les plus rapidement condensables, tandis que le bistre ne comprend que les parties les plus légères.

Le bistre se trouve en effet formé par de la vapeur d'eau et différentes vapeurs telles que l'aldéhyde formique, l'acide acétique, l'alcool méthylique, la créosote, les goudrons de la série légère, l'ammoniaque, l'acide sulfureux, etc..., tandis que le calcin comprend des goudrons de la série lourde, des résines, etc...

Quant à la *suie* elle est également un résultat de la combustion, mais de la combustion incomplète du combustible; elle est composée de carbone pur provenant du carbone volatil non brûlé par manque d'oxygène et condensé au contact des parois froides, de fines particules de combustible non brûlé, de coke et de mâchefer formés par le combustible au cours de sa combustion, et de matières inertes (cendres) entraînées par le tirage; l'ensemble est par lui-même incombustible mais peut le devenir à la suite de l'agglutination de ces différentes particules avec des résines, des goudrons, des graisses, des poussières, sous forme de moutons constituant des amas spongieux des plus inflammables.

La première chose à retenir de ces divers éléments très souvent superposés est que le bistre n'est pas combustible alors que le calcin est essentiellement inflammable aussitôt qu'il se trouve ramolli et porté à une certaine température, et que la suie ne l'est pas quand elle est simplement en dépôt, mais l'est quand elle est sous la forme de moutons. Et ceci a une très grosse importance parce qu'il faut tout de même faire cesser l'hérésie qui est journellement commise au sujet des dépôts de suies considérés comme vice de construction, alors que ces dépôts de suies en principe ne sont coupables de rien du tout, la suie formant ces amas ne pouvant pratiquement pas brûler.

Dans les appareils capte-suies où par leur fonction même il s'accumule des amas considérables de suie, jamais il ne se produit aucune inflammation ni combustion de celle-ci.

Qui plus est, quand il y a feu de cheminée, il y a combustion du calcin et des suies moutonneuses; mais on retrouve dans toutes les parties du conduit la suie formée au cours de cette combustion, cette suie n'ayant pas brûlé.

Par contre, du fait que la suie moutonneuse est essentiellement inflammable, le ramonage des conduits est indispensable, de façon à débarrasser les parois des conduits de ces moutons et d'empêcher que, par leur combustion, ils ne mettent le feu au calcin auquel ils adhèrent.

Chacun de ces trois éléments, bistre, suie et calcin, ayant ses inconvénients propres, nous allons les examiner successivement avec les résultats qui en découlent.

Ayant déjà fait traiter l'ensemble de la question des conduits de fumée au VI<sup>e</sup> Congrès du Chauffage et de la Ventilation des Locaux habités, en 1937, par onze rapporteurs de la Chambre Syndicale des Entrepreneurs de Fumisterie, Chauffage et Ventilation (maintenant devenue Chambre Syndicale des Entrepreneurs d'Installations thermiques), je n'ai eu qu'à reprendre le rapport de M. CANTONI, que j'avais alors chargé de l'étude des phénomènes se présentant dans ces conduits, pour y retrouver ce dont j'avais besoin comme premier élément. De même j'ai utilisé les rapports de M. le professeur VERON pour ce qui concerne le tirage, de mon associé M. MONTARIOL et de M. André NESSI en ce qui concerne la résistance et la

température des parois, de MM. BRUN et HAILLOT en ce qui concerne les matériaux, et de M. MARTEL, sur l'introduction de l'air dans les conduits desservant les appareils à feu fermé, à combustion réglable menés au ralenti.

Je renverrai donc ceux que l'ensemble de tout ce qui a trait aux conduits de fumée intéresse à ces onze rapports qui forment avec leurs discussions, 270 pages, ainsi qu'aux deux communications qui ont été présentées en septembre

dernier au VII<sup>e</sup> Congrès, par M. le professeur RIBAUD et M. GOUFFÉ et aux diverses conférences que j'ai déjà faites sur la grande cheminée rurale, les calorifères, la fumivorité et le dépoussiérage, les feux de cheminée, les nouvelles cheminées, etc., etc., où ils trouveront tout ce qu'ils peuvent désirer. Aujourd'hui je m'en tiendrai à ce qui nous intéresse immédiatement, et je commence par le bistre.

## BISTRE

Dans son rapport sur ce qui se passe dans les conduits, M. CANTONI dit : « Le bistre est une condensation abondante et généralement momentanée se produisant à l'allumage de tout foyer, avec tout combustible; c'est un liquide à forte teneur en eau, chargé de parcelles de carbone et d'huiles empyreumatiques.

« La couleur varie du noir au sépia et, fait particulier, les taches causées par ce produit sont indélébiles sur les matériaux qu'il a imprégnés.

« Sa production s'explique par le fait qu'à l'allumage des foyers et dans le but de créer une dépression, on emploie des combustibles à haute teneur en eau (bois, copeaux par exemple), à faible pouvoir calorifique et à grande émission de fumée.

« Au contact des parois froides des conduits, les produits de combustion se condensent et ruissellent le long de celles-ci.

« Ce phénomène disparaît quand le tirage du conduit est établi et les parois suffisamment chaudes.

« Toutefois, certaines dispositions et certains appareils favorisent la production du bistre.

« Les poêles dits « à combustion lente » bistront fortement les conduits qui les desservent.

« En effet, les conduits dans les immeubles répondent au besoin des cheminées à feu ouvert, entraînant un grand volume d'air. La section de ces conduits est de 4 dm<sup>2</sup> en conformité des règlements en vigueur.

« Dans ces conduits, la vitesse des gaz de la combustion des poêles à combustion lente est généralement réduite et le refroidissement des produits gazeux est important.

« Il en résulte donc qu'une section mieux appropriée au volume des produits de combustion permettrait une évacuation plus rapide et un meilleur résultat.

« Toutefois, les termes du règlement de police ne permettent pas d'apporter les remèdes qui conviendraient. »

J'ai tenu à rappeler toute cette partie de son rapport car elle situe bien le problème et va me permettre, par une étude plus approfondie, de mieux vous montrer ce qui se produit, ce à quoi nous avons à faire face et comment trouver une solution.

Tout d'abord, du fait de sa composition, le bistre qui s'écoule dans des conduits métalliques où il ruisselle sans en pénétrer les parois et celui qui imprègne les conduits en maçonnerie présentent des inconvénients différents, et tout en étant la même chose, se montrent sous des formes différentes.

Lorsqu'il s'écoule des conduits imperméables et comprend tout l'ensemble de ce qu'a indiqué M. CANTONI, le bistre est un produit noir. Lorsqu'il se dépose sur des éléments poreux, tels que les matériaux de maçonnerie (briques, poteries, plâtre, etc...) constituant les parois des conduits de fumée, ses parties noires restant sur la face intérieure du conduit, il devient incolore n'étant plus composé que d'eau chargée de produits pyrolytiques. Cette eau se diffuse dans la masse des conduits et par osmose arrive à leur face extérieure, où alors, et seulement par oxydation au contact de l'air, elle produit les taches jaunes, brunes et noires que nous constatons et qui sont cause dans les pièces où elles se produisent des odeurs caractéristiques, âcres, désagréables, entêtantes et parfois si insupportables que ces pièces en deviennent parfois pratiquement inhabitables.

Plus le combustible est humide et à forte teneur en eau et en hydrogène, plus il est brûlé au ralenti avec un plus faible excès d'air sur la quantité nécessaire à sa combustion théorique, et plus le conduit est refroidi, plus il y a formation de ce bistre et de ce fait imprégnation des matériaux.

Naturellement, plus les matériaux sont poreux, plus ils sont rapidement pénétrés et imprégnés; la pénétration du bistre dans leur masse et sa transmission à l'extérieur suivent une loi analogue à celle de la pénétration et de la transmission de la chaleur à travers ces matériaux, ces deux phénomènes étant régis par des formules analogues, de même que l'évaporation de l'eau des ciments (Retrait).

Toutes ces formules découlent de la formule générale

$$K \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

donnant pour le mur plan  $K \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{\partial \theta}{\partial t}$  où, en ce qui concerne la chaleur, K est le coefficient de diffusivité,

$K = a = \frac{\lambda}{c \gamma}$ ,  $\lambda$  le coefficient de conductibilité,  $c$  la chaleur spécifique,  $\gamma$  la densité,  $\theta$  la température,  $t$  le temps,  $x$  la distance du point considéré à la face d'entrée, et l'ensemble exprime la variation du flux thermique en ce point, alors que dans le phénomène de la propagation de

l'humidité, K est un coefficient de diffusion  $\frac{\lambda}{\epsilon a}$ , analogue au coefficient  $a$ , dépendant des propriétés du matériau,  $\theta$  le degré d'imprégnation,  $t$  le temps,  $x$  la distance du point considéré à la face humidifiée, et l'ensemble exprime la variation du flux d'imprégnation ou de la teneur en

eau. Mais la formule est plus compliquée parce que si pour la chaleur la fonction  $\theta_x$  au point  $x$  ne dépend pour un matériau déterminé que de la température de la face chauffée, dans le cas de l'humidification par un liquide complexe, chacun des divers éléments peut avoir une action différente sur le matériau suivant sa concentration et sa température.

Le phénomène se complique donc, et ce d'autant que la pression elle-même agissant sur le liquide peut avoir une certaine importance tant directement que par la variation qu'elle peut entraîner dans la condensation, c'est-à-dire dans la formation de l'humidité se déposant sur le matériau.

Cette condensation est de plus variable avec la concentration de certains éléments et peut se produire à une température supérieure à celle à laquelle elle devrait normalement se produire s'il n'y avait que de la vapeur d'eau.

Voici un exemple, donné par M. le professeur VERON au Congrès de 1937, montrant comment la température de condensation de la vapeur d'eau se trouve relevée à

Relèvement de la température de condensation de la vapeur d'eau par la présence de  $\text{SO}_3$ .

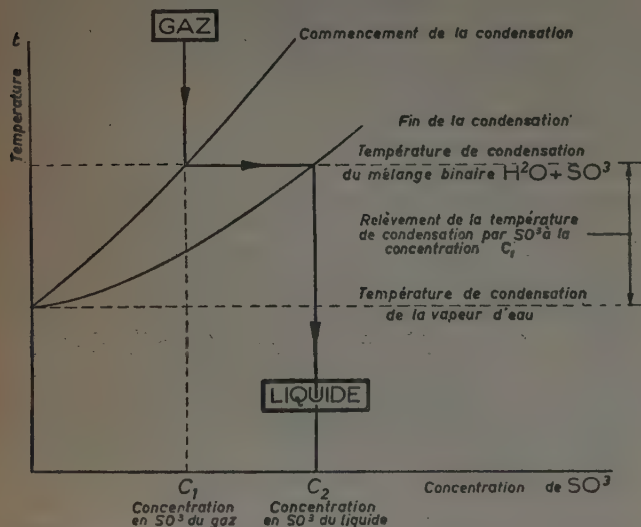


FIG. 1. — Aggravation des chances de bistrage par la présence de vapeurs autres que celles de  $\text{H}_2\text{O}$ .

celle du mélange  $\text{H}_2\text{O} + \text{SO}_3$  par la présence de ce dernier (fig. 1).

De plus, cette condensation est souvent accentuée par l'action des moutons de suies qui se trouvent dans les conduits de fumée et qui jouent alors vis-à-vis des gaz une sorte de rôle catalytique amenant la formation d'acide sulfurique, d'où il résulte une attaque des matériaux, surtout s'ils sont métalliques et ferreux. M. PIGRAIS a fait sur ce sujet des travaux des plus intéressants.

Un autre phénomène entre aussi en jeu, à savoir, quand deux gaz à des températures différentes sont l'un et l'autre saturés, leur mélange est sursaturé, ainsi que vient de le rappeler M. PORTEVIN dans *Chaleur et Industrie*. Ceci

explique la condensation abondante qui se produit à la sortie des conduits par temps humide (air extérieur saturé) quand les gaz qui en sortent sont eux-mêmes saturés (surtout dans les appareils menés au ralenti) (fig. 2).

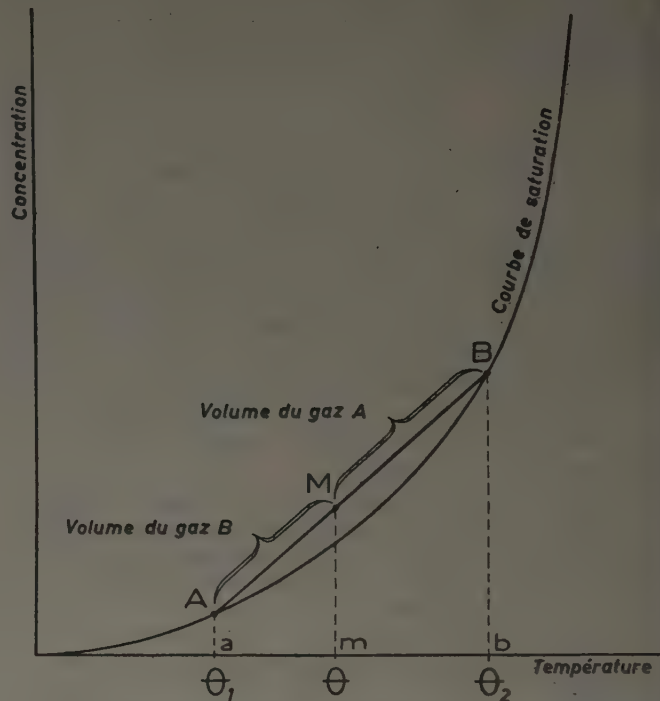


FIG. 2. — Aggravation des chances de bistrage par temps humide. (Quand deux gaz sont saturés de la même vapeur leur mélange est sursaturé.)

Si  $\frac{AM}{MB} = \frac{\text{Volume du gaz saturé à } \theta_2}{\text{Volume du gaz saturé à } \theta_1}$ ,  $\theta$  est la température du mélange et  $M_m$  sa concentration; le point M étant au-dessus de la courbe, le mélange est sursaturé.

Ceci dit, ayant montré toute la complication de ce qui peut se passer dans un conduit, et n'ayant pas le temps de nous y attarder, nous ne pouvons que constater les faits suivants :

1° les suies moutonneuses déposées le long des conduits ne peuvent qu'aggraver la condensation et le dépôt du bistre en même temps que la concentration des différents produits qui le composent;

2° plus un conduit est encrassé, moins il se laisse facilement traverser par le bistre du fait du colmatage de ses pores (les conduits neufs sont des plus rapidement imprégnés dans toute leur masse);

3° une fois les parois imprégnées, si l'on enlève les parties extérieures tachées, l'intérieur de ces parois ne paraît pas avoir été atteint, mais au bout de très peu de temps, si on laisse ces parties paraissant saines à l'air, elles se teintent à leur tour;

4° si l'on refait l'enduit sur ces parties qui paraissent saines, au bout de très peu de temps cet enduit se tache exactement comme était taché le premier, les taches réapparaissant presque aussitôt;

5° dans ces conditions, il apparaît que la seule réparation susceptible de donner satisfaction est l'enlèvement de tout ce qui a pu être atteint, c'est-à-dire pratiquement de toute l'épaisseur du conduit et de toutes les parties qui de chaque côté peuvent avoir été imprégnées.

Ce remplacement, s'il donne alors entièrement satisfaction comme l'expérience le prouve, ne peut malheureusement rien contre le renouvellement du phénomène et ses inconvénients si on laisse celui-ci se reproduire.

Nous voici donc en présence de deux problèmes :

1° comment empêcher le bistre de se produire ?

2° comment réparer les dégâts commis par celui-ci et les empêcher de se renouveler si ce bistre arrive à se reproduire ?

Ce deuxième problème est connexe de celui qui a pour objet la suppression des dégâts qui se produisent au cours d'un feu de cheminée, leur solution conduit à une conception toute différente de la construction des conduits de fumée. Étant donné le grand nombre des facteurs à considérer, nous ne le traiterons qu'*in fine*, après avoir examiné ce qui se passe à l'intérieur même des matériaux au cours des feux de cheminée.

*Comment empêcher le bistre de se produire et de se déposer dans l'intérieur des conduits de fumée ?*

Le bistre étant constitué en grande partie par la vapeur d'eau et celle-ci formant le support des éléments qui nous gênent, il s'agit tout d'abord de bien voir dans quelles conditions cette vapeur d'eau se trouve produite et se condense. Pour cela, nous devons tout d'abord examiner les caractéristiques des appareils couramment utilisés à l'heure actuelle, puisque c'est avec ces appareils que se produisent plus particulièrement les inconvénients dont nous avons à nous plaindre.

## Examen des appareils.

Ces appareils sont des appareils à feu fermé, à combustion continue, réglable par l'admission de l'air grâce à un régulateur étranglant et pouvant même fermer complètement cette admission d'air.

Ces appareils ont un fonctionnement essentiellement différent de celui des appareils à feu vif d'autrefois (cloches lyonnaises, poêles de construction de salle à manger, fourneaux de cuisine, calorifères à air chaud) où l'air nécessaire à la combustion avait libre accès sous la grille, et dont le fonctionnement n'était réglé que par une clé ou registre sur le conduit de fumée (*moyen de réglage primitif essentiellement dangereux par la surpression qui peut en découler dans les appareils et le déversement des gaz nocifs qui peut s'ensuivre dans les pièces où ceux-ci se trouvent*); leur fonctionnement diffère également à fortiori complètement de celui de l'ancienne cheminée à feu ouvert où la combustion s'opérait on peut dire à l'air libre.

En effet, alors que dans ces cheminées et appareils à feu vif, une quantité d'air considérable, de beaucoup supérieure à celle théorique strictement nécessaire à la combustion, se trouvait adjointe aux gaz de la combustion, dans ces nouveaux appareils, cette quantité d'air supplémentaire se trouve des plus réduites; il en résulte une dilution beaucoup plus faible des produits de la combustion

et notamment une teneur en eau beaucoup plus importante, et même tellement importante que sitôt le moindre refroidissement des gaz évacués, leur point de rosée se trouvant atteint, une condensation abondante ne manque pas de se produire, chose qui n'arrivait jamais avec les appareils à feu vif, ni à fortiori avec les cheminées à feu ouvert où la masse d'air assurait une telle dilution de la vapeur d'eau que jamais les gaz n'atteignaient leur point de rosée avant leur sortie dans l'atmosphère.

Dans une cheminée en effet il est pratiquement employé 100 m<sup>3</sup> d'air (c'est-à-dire environ 130 kg) par kilogramme de bois brûlé et 160 m<sup>3</sup> d'air (c'est-à-dire environ 200 kg) par kilogramme de charbon (*ce qui explique le mauvais rendement de ces cheminées*), alors que théoriquement il ne faut que 4,50 kg d'air pour brûler 1 kg de bois sec à 25 % d'eau et 10 kg par kilogramme de charbon. Les gaz à la sortie sont aux environs de 90° et étant donné leur teneur en eau, leur point de rosée se trouve dans les environs de 15°; la marge est telle qu'aucune condensation dans ce cas n'est à craindre. Seules se déposent alors les cendres, goudrons, résines et graisses (*c'est-à-dire le calcin dont la condensation débute dans les environs de 160°*); ce dépôt se produit dès les parties basses du conduit; il enduit gousset et avaloir, voire la partie supérieure du foyer et les objets qui peuvent y être suspendus.

Il en est évidemment tout autrement avec les foyers à feu fermé à combustion continue réglable, dont les gaz quoique en moindre quantité, ont une concentration beaucoup plus grande et une teneur en eau beaucoup plus importante; comme ces gaz sont évacués en outre à une température beaucoup plus faible, ils atteignent rapidement leur point de rosée et produisent une condensation abondante en plus des dépôts de calcin et de suies qui se forment dès la sortie des appareils et parfois même à l'intérieur de ceux-ci.

Ces inconvénients se manifestent naturellement d'autant plus que l'admission d'air est plus réduite, c'est-à-dire que le foyer fonctionne plus au ralenti, car la quantité et la température des gaz sont alors moins grandes : il en résulte finalement que les gaz sont plus vite refroidis et que leur vitesse dans le conduit est plus faible.

Il est donc très important de choisir l'appareil adéquat pour que son fonctionnement ait lieu dans des conditions normales; à ce point de vue il ne suffit pas de regarder l'appareil, mais il convient de pouvoir le juger *d'après ses courbes caractéristiques*, en se disant que le mieux est souvent l'ennemi du bien, et qu'il ne faut pas voir dans un appareil uniquement le rendement lui-même, du reste toujours sujet à critique, mais l'ensemble de toutes les particularités de l'appareil, compte tenu de l'usage que l'on doit en faire.

Il faut donc bien se dire que ces nouveaux appareils ayant été conçus et normalisés pour donner les meilleurs résultats avec les combustibles actuels, il faut bien se garder :

a) d'y faire des adjonctions telles que repos de chaleur et autres, peut-être en principe des plus intéressantes au point de vue rendement calorifique, mais qui ne peuvent se traduire que par des inconvénients de bistrage et un amoindrissement du tirage, donc de la sécurité;

b) d'y brûler autre chose que ce pour quoi ils ont été établis et, s'ils sont faits pour divers combustibles, il y a lieu

d'examiner les courbes caractéristiques correspondant à chacun de ceux-ci et plus particulièrement celles qui concernent le combustible que l'on aura à utiliser.

C'est évidemment, pour beaucoup de gens, quelque chose de nouveau que d'avoir à se préoccuper de ces courbes pour le choix d'un appareil, alors que pour la plupart un appareil de chauffage n'est qu'une boîte que l'on choisit uniquement pour sa forme, sa couleur, sa décoration, son encombrement, sans penser que tout de même il a été conçu et établi pour brûler telle chose ou telle autre et que, si l'on veut qu'il vous donne satisfaction, il faut que soit employé le combustible pour lequel il a été étudié et qu'il soit mis dans des conditions qui lui permettent de fonctionner correctement.

L'affaire est évidemment très délicate dans la situation actuelle où il est souvent difficile de se procurer le combustible qui convient et où, en fait, les appareils sont conçus pour des combustibles différents de ceux que le public peut avoir à sa disposition; mais ce n'est tout de même pas une raison pour ne pas regarder les choses de près quand on a à acheter un appareil et pour ne pas exiger du constructeur les renseignements qui sont indispensables pour savoir à quoi s'en tenir sur cet appareil.

Une amélioration a tout de même été réalisée; à l'avenir les appareils devront correspondre à des normes et porter, en plus de leur marque, l'indication de leur puissance et

mais petit bonhomme fera son chemin et, quelles que soient les sujétions qui en résultent, il faudra bien, si l'insistance générale s'en mêle, que ces courbes soient fournies; ce sera alors un grand pas de fait, car au moins les spécialistes pourront juger en connaissance de cause quel appareil convient le mieux pour chaque cas; ainsi un peu d'ordre sera remis dans la vente et dans l'installation des appareils pour le plus grand bien de tous, le commerce des poêles ne pouvant pas être indéfiniment et uniquement réservé aux incompetents et aux charlatans, comme il l'est pratiquement actuellement où le commerce est seul maître au détriment de toute technique et de toute sécurité.

### Examen des combustibles.

Parmi les combustibles actuellement utilisés, il faut distinguer les combustibles solides, les combustibles liquides et les combustibles gazeux.

Les principaux combustibles solides pratiquement utilisés dans les appareils de chauffage domestique sont le bois, la tourbe, le coke, la houille, sous leurs diverses formes et sous leurs différentes qualités : bûches, bois normalisé, de toutes essences, brande (*racine de bruyère*), tourbe naturelle ou agglomérée seule ou avec d'autres éléments, cokes divers, y compris coke de récupération, anthracite et anthraciteux de tous genres, charbons crus ou agglomérés, agglomérés divers, sans compter tout ce qui peut se brûler, tels que bois de démolition, pavés de bois, lignite, etc...

Parmi les combustibles liquides, en laissant de côté l'alcool, l'essence et le pétrole peu employés pour le chauffage, on trouve les huiles lourdes, gaz-oil, diesel-oil, gaz-oil domestique, fuel-oil 1 et 2.

Comme combustibles gazeux utilisés en pratique pour le chauffage, on ne peut citer que le gaz d'éclairage, plus ou moins chargé de gaz à l'eau et, dans la région de Toulouse, le gaz naturel, le butane et le propane n'étant généralement pas employés pour le chauffage.

Notre conférence s'appliquant plus spécialement aux foyers domestiques et aux inconvénients des appareils à combustibles solides courants, les tableaux que nous vous présentons concernent uniquement les principaux combustibles solides; nous vous renvoyons au traité de M. GUILLERMIC pour ce qui concerne les combustibles liquides et aux renseignements du Gaz de France pour ce qui concerne l'emploi du gaz, tout en attirant cependant votre attention sur le fait que le mètre cube de gaz produisant 1 kg de vapeur d'eau, tout ce qui a trait à la condensation de celle-ci dans les conduits de fumée des appareils à gaz est analogue à ce qui se passe avec les appareils à combustible solide, et que, de ce fait, les mêmes précautions doivent être prises dans les deux cas, quoique la question du tirage n'ait pas à intervenir pour les appareils à gaz (fig. 4).

La courbe de la quantité d'eau contenue par kilogramme d'air sec saturé aux différentes températures vous montre combien celle-ci peut être variable, passant de 3,80 g à 0° à l'infini pour 100° (fig. 5).

Cette courbe a été déduite des tables qui se trouvent dans les manuels classiques; malheureusement la formule

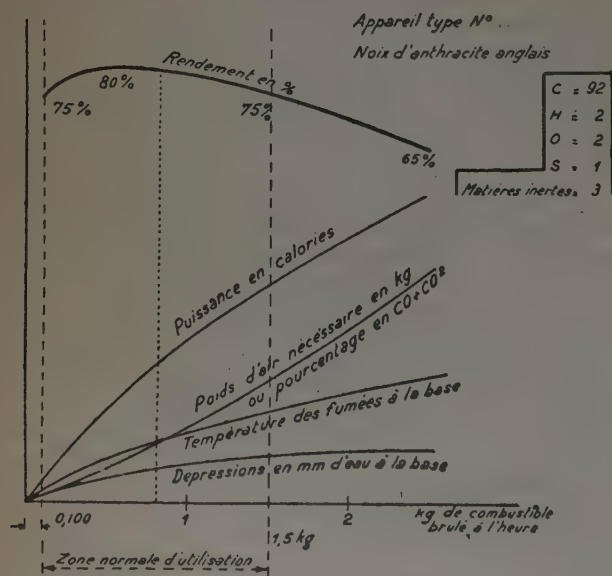


FIG. 3. — Courbes caractéristiques.

du combustible à employer; mais cela est encore insuffisant, et ce qu'il importe d'avoir, tout au moins pour les professionnels, ce sont les courbes caractéristiques des appareils, car seules elles fournissent aux installateurs les indications dont ils ont besoin (fig. 3).

Je sais que la production de ces courbes caractéristiques n'est pas vue favorablement par les constructeurs et que ceux-ci apportent la plus grande résistance à les fournir;

de cette courbe n'est pas donnée dans les manuels. On peut en déduire la condensation qui peut se produire au fur et à mesure de l'abaissement de la température; pour cela, si on avait la formule, il suffirait d'en prendre la dérivée, mais sans elle on peut encore en avoir une représentation approchée en calculant la condensation qui peut s'opérer entre différentes températures successives et en joignant les points ainsi déterminés.

J'en avais personnellement cherché une formule approchée de la forme  $Ae^{at+bt+ct}$ ; mais étant donné sa complexité, je l'ai volontairement aujourd'hui laissée de côté, quoiqu'elle ait une assez grande importance pour connaître, en plus de la quantité d'eau condensée, la quantité de chaleur libérée par la condensation de la vapeur d'eau. Le relèvement de température qui s'ensuit n'est certainement pas négligeable et ne peut que contre-balancer en partie le refroidissement et la condensation dans le conduit.

Il ne faut pas oublier en effet que la condensation de 1 kg de vapeur d'eau à une température  $t$ , donne une quantité de chaleur égale à  $(606,5 + 0,305 t - t)$  calories, c'est-à-dire pratiquement dans les 500 calories, ce qui explique : 1° le retard réel du refroidissement des gaz humides dans les conduits par rapport à la théorie, malgré l'augmentation de la transmission des parois rendues plus conductrices du fait de la condensation et, 2° la non-production de condensation dans les premières parties des conduits de fumée où cette condensation devrait cependant

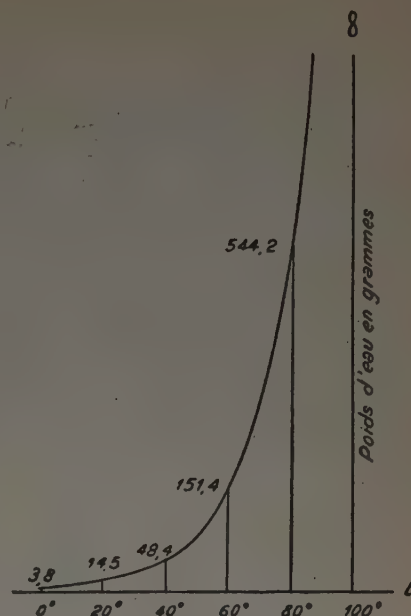


FIG. 5.

Poids de vapeur d'eau en grammes contenu par kilogramme d'air sec dans l'air saturé suivant la température sous 760 mm de mercure.

## COMPOSITION DES COMBUSTIBLES SOLIDES

	BOIS		TOURBE sèche	COKE		BOUILLES				OBSERVATIONS
H <sup>2</sup> O	50,0	25,0	30,0	20,0	5,0	0	0	0	H <sup>2</sup> O	Ces combustibles ont été pris comme types principaux parmi ceux utilisés. Bois vert Bois sec (2 ans) Tourbe sèche Coke mouillé Coke sec Anthracite 1/2 gras, 1/4 gras, courant.
C	25,0	37,5	37,8	66,0	78,37	92	80	77	C	
H	3,0	4,5	3,5	0,32	0,38	2	3	4	H	
O	20,5	30,75	21	1,36	1,62	2	4	6	O	
Az	0,5	0,75	0,7	0,32	0,38	1	3	3	S	
MI	1,0	1,5	7,0	12,0	14,5	3	10	10	MI	
	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0		

Quantité d'air théorique nécessaire pour en brûler 1 kg.

P <sub>Th</sub>	3,031 kg	4,547 kg	4,567 kg	7,629 kg	9,034 kg	11,423 kg	10,389 kg	10,119 kg	P <sub>Th</sub>	Air 1/2 saturé à 15° sous 760 mm de Hg.
-----------------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------------	---

Poids d'eau contenu dans 1 kg de gaz secs et températures de saturation.

P <sub>1,5</sub> t <sub>s1,5</sub>	0,170 kg 62°	0,109 kg 55°	0,101 kg 53°	0,024 kg 28,5°	0,012 kg 17°	0,014 kg 19,5°	0,021 kg 26°	0,027 kg 30°	P <sub>1,5</sub> t <sub>s1,5</sub>	Pour une combustion avec un excès d'air de 50 % sur P <sub>Th</sub> .
---------------------------------------	-----------------	-----------------	-----------------	-------------------	-----------------	-------------------	-----------------	-----------------	---------------------------------------	---

FIG. 4.

être des plus importantes d'après la forme même de la courbe.

Le tableau de la composition des divers combustibles donne en première ligne leur teneur en eau, puis successivement leur teneur en carbone, hydrogène, azote et matières inertes par kilogramme, et il y a lieu de remarquer que pour les houilles auxquelles sont réservées les trois dernières colonnes, l'azote se trouve remplacé par le soufre dont le rôle est essentiellement différent. L'azote est inerte et ne forme à la rigueur que des produits nitreux, tel que l'ammoniac (*basique*), alors que le soufre oxydable et combustible peut donner des produits acides, acide sulfhydrique et acide sulfureux, ce dernier pouvant donner, au contact des suies, par concentration et transformation, de l'acide sulfurique, éminemment destructeur surtout pour les parties métalliques (et notamment pour les produits ferreux plus particulièrement attaquables) ainsi que pour les matériaux calcaires ou contenant de la chaux.

Le tableau de la figure 4 donne ensuite la quantité d'air théorique nécessaire à la combustion de 1 kg de combustible, puis la quantité d'eau contenue dans 1 kg de gaz produit dans une combustion effectuée avec 50 % d'excès d'air à moitié saturé à 15° et enfin les températures de saturation qui en découlent; ces chiffres donnent une idée de la quantité d'eau qui peut être condensée et cette quantité est très différente de celle qui provient de l'humidité propre du combustible, car la combustion de l'hydrogène qui peut être contenu dans le combustible donne elle-même une quantité d'eau non négligeable s'ajoutant à la première, et il s'y ajoute encore la quantité d'eau contenue dans l'air comburant.

C'est ainsi que, 1 kg de bois sec, qui après deux années de séchage ne contient plus que 250 g d'eau (d'humidité) peut produire 689 g d'eau, et que les houilles sèches ne contenant pratiquement aucune eau de constitution, ni d'humidité, peuvent donner naissance à des quantités d'eau variant de 248 à 420 g/kg de combustible brûlé.

La présence à la fois d'oxygène et d'hydrogène explique de plus par l'oxyhydrile (OH) qui en découle la formation des acides et les inconvénients qui en résultent.

Étant donné la quantité d'eau produite par la combustion de ces combustibles (compte tenu de la quantité d'eau apportée par l'air comburant, quantité qui est fonction de la quantité d'air utilisée au cours de la combustion), nous avons tracé les courbes donnant la température de saturation des gaz produits en fonction de la quantité d'air entraînée. Celle-ci est exprimée en multiple de la quantité d'air théoriquement suffisante pour leur combustion. On voit ainsi, compte tenu de la température pouvant régner dans les conduits de fumée, la quantité d'air qu'il est indispensable de

mettre en jeu pour éviter la condensation de la vapeur d'eau dans les conduits (dans les conditions normales de condensation de la vapeur d'eau). Il est entendu que les températures de saturation ainsi trouvées ne peuvent être considérées que comme des minima, car des condensations peuvent se produire à des températures supérieures lorsque les gaz de la combustion se trouvent en présence d'autres éléments en plus de la vapeur d'eau. A notre avis, une marge est donc nécessaire (fig. 6).

Ces courbes montrent cependant d'une façon très nette :

1° l'écart qu'il y a entre la quantité d'air nécessaire pour ne pas atteindre le point de rosée et celle qui normalement est utilisée dans les appareils;

2° l'importance qu'il y a à augmenter cette dernière (par une admission d'air supplémentaire) de façon à ce que les gaz soient suffisamment dilués pour ne pas atteindre le point de rosée avant leur sortie du conduit de fumée (afin d'éviter toute condensation avant cette sortie).

Cette admission d'air supplémentaire peut être réalisée dans les conditions suivantes (fig. 7).

Déjà dans les appareils à gaz, pour éviter cette condensation, une admission d'air supplémentaire a été recommandée et est maintenant admise; mais que de critiques celle-ci n'a-t-elle pas soulevées sous le prétexte qu'elle était dangereuse, alors que pratiquement elle ne donne jamais aucun inconvénient si les précautions complémentaires indispensables à son bon fonctionnement sont prises. Par ailleurs, s'il s'est produit des accidents, ceux-ci lui ont été imputés à tort par suite d'un examen insuffisant et sans qu'il ait été réellement tenu compte des autres facteurs qui avaient pu alors se trouver en jeu et étaient seuls responsables de ces accidents.

De ce côté, on ne saurait trop s'élever contre une interprétation erronée de l'article 6 de l'ordonnance de police

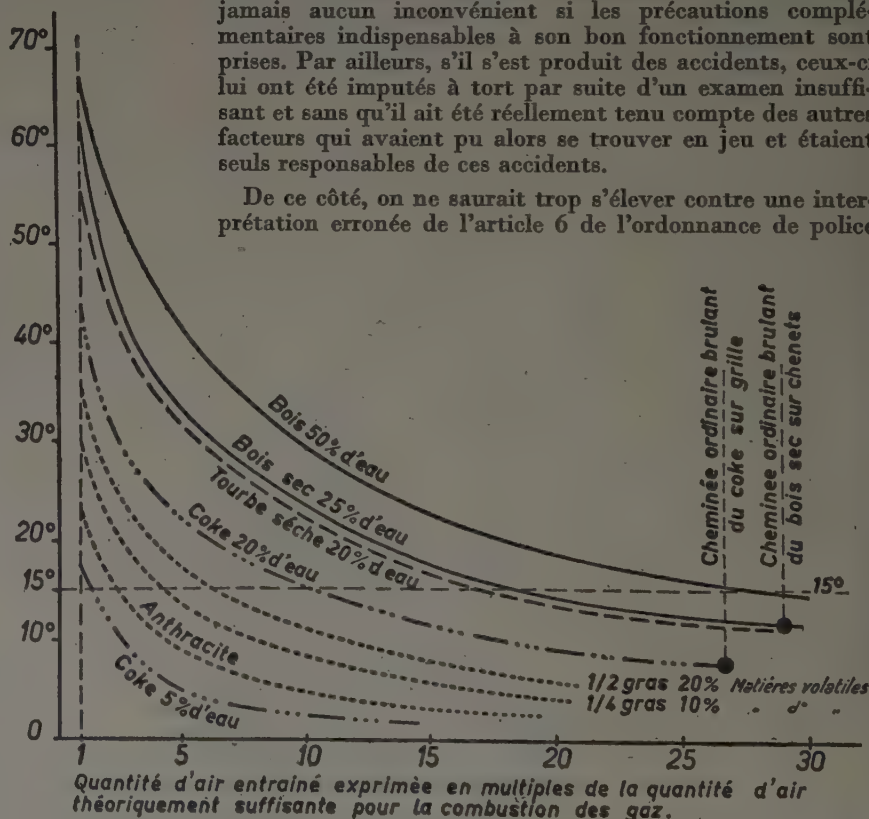


FIG. 6. — Températures de saturation des gaz de la combustion des combustibles solides suivant la quantité d'air entraînée.

N. B. — La parallèle de 15° montre la quantité d'air minimum qui doit être employée pour qu'à cette température les gaz n'atteignent pas leur point de rosée.

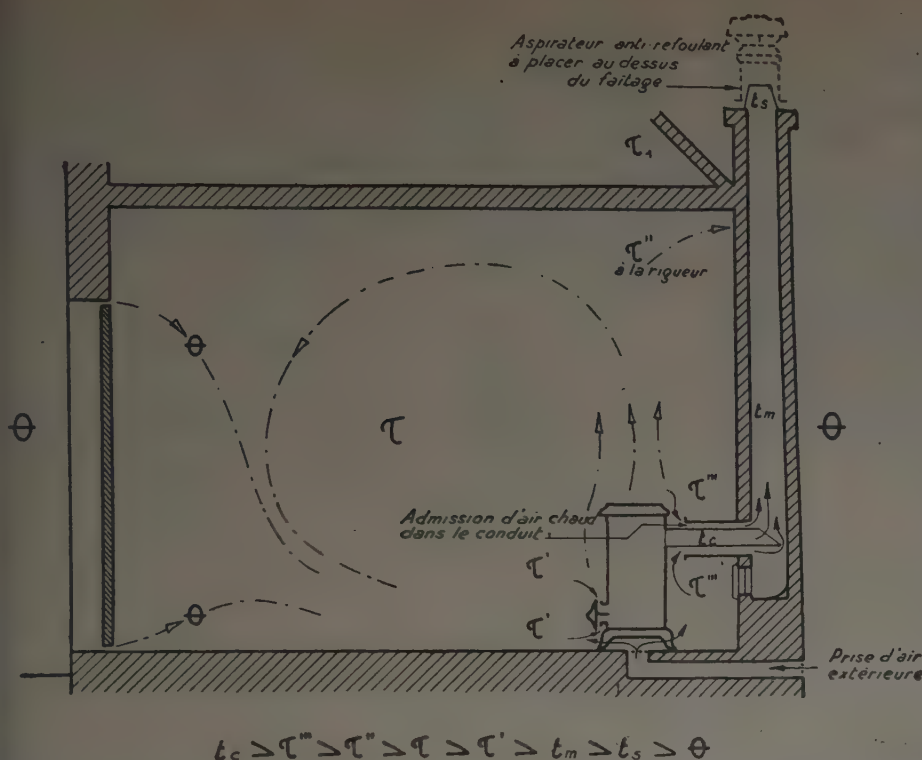


FIG. 7.

de 1906-1917 (concernant les précautions à prendre contre l'incendie) dont le texte ne défend nullement cette admission d'air auprès de l'appareil et dans la pièce où il est installé, mais défend uniquement de faire une ouverture sur un conduit de fumée dans la traversée d'un étage pour y faire pénétrer de la fumée, des gaz, de la vapeur et même de l'air (ce qui est des plus normal mais n'est plus du tout la même chose).

Cette mauvaise interprétation qui s'est généralisée a conduit à des injustices lamentables rendant responsables d'accident des gens qui n'y étaient absolument pour rien et qui se sont trouvés alors aux prises avec les plus grandes difficultés pour faire remettre les choses au point.

Pour bien montrer quelle est l'erreur commise du fait de cette mauvaise interprétation (interprétation consistant à dire qu'une semblable prise d'air est dangereuse), nous allons montrer ce qui se passe réellement dans le tirage d'un conduit de fumée quand on y introduit de l'air dans certaines conditions.

Pour ce faire, nous devons tout d'abord rappeler que le tirage quand il n'y a pas de condensation dans le conduit est fonction de la loi d'écoulement des fluides établie par BERNOULLI, dont la formule générale est :

$$Z_1^2 + \int_1^2 v dp + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + h_1^2 = 0$$

dans laquelle  $z_1^2$  est relatif à la différence d'altitude des deux points extrêmes du conduit et par conséquent en relation avec la gravité agissant sur le fluide circulant,  $\int_1^2 v dp$  est re-

latif à l'énergie interne de ce fluide,  $\frac{V_2^2 - V_1^2}{2g}$  est relatif à la différence

des forces vives agissant sur celui-ci aux deux extrémités du conduit,  $h_1^2$  est relatif aux résistances qui s'opposent à son mouvement et peut être ramené comme le premier terme à une hauteur de fluide. Tous ces termes représentent des charges ou des poids. La différence de poids qui peut exister entre la colonne de gaz chauds circulant dans le conduit et la hauteur correspondante de l'air extérieur nous amène à rechercher la température moyenne des gaz qui se trouvent dans le conduit et (celle-ci étant naturellement fonction de la température de sortie) à connaître la température qui peut exister à la sortie, c'est-à-dire au bout d'une longueur L après l'entrée des gaz dans le conduit.

Les formules donnant la température  $T_L$  de ces gaz au bout d'une distance L et la température

moyenne  $T_m$  de ceux-ci dans cette longueur sont :

$$T_L = \mathcal{E}_m + (t_e - \mathcal{E}_m) e^{-\frac{xgL}{Pc}}$$

et

$$T_m = \mathcal{E}_m + (t_e - \mathcal{E}_m) \frac{e^{-\frac{xgL}{Pc}} - 1}{\frac{xgL}{Pc} e^{-\frac{xgL}{Pc}}}$$

ou

$$T_m = \mathcal{E}_m + (t_e - T_L) \frac{Pc}{gL}$$

On y remarque que la température de sortie d'où dépend naturellement la température moyenne est fonction de l'ambiance moyenne  $\mathcal{E}_m$  régnant autour du conduit dont dépend le refroidissement ( $\mathcal{E}_m$  pouvant être différente de la température  $\theta$  de l'air extérieur), de la température d'entrée des gaz  $t_e$  et de l'exposant négatif d'une exponentielle dont le numérateur comprend ce qui peut refroidir (le périmètre  $x$ , la longueur L et le coefficient de transmission de chaleur correspondant  $g$ ) et le dénominateur la capacité calorifique de la masse de gaz sur laquelle agit le refroidissement (P étant le poids des gaz et  $c = 0,24$  la chaleur spécifique de ceux-ci).

Ce coefficient négatif fait que plus cet exposant est grand, plus le terme exponentiel est faible; donc celui-ci est d'autant plus petit que pour un même conduit dans lequel  $x$ ,  $g$ , L se trouvent constantes, P, le poids de gaz, est plus faible.

Si  $P$  est petit comme cela est dans les appareils actuels, il s'ensuit une baisse très rapide de ce terme exponentiel, non seulement lorsque  $L$  croît, mais aussi lorsque  $\kappa$  et  $q$  augmentent amenant la température de sortie  $T_s$  pratiquement à celle de l'ambiance  $\mathcal{E}_m$  régnant autour du conduit, aussitôt que ces trois éléments  $\kappa$ ,  $q$ ,  $L$ , se trouvent avoir la moindre importance.

Si au contraire on augmente le poids de gaz tel que  $P'' > P$  le terme exponentiel (négatif) augmente et la température de sortie devrait normalement augmenter.

Mais, d'un autre côté, si l'on introduit de l'air à une température  $t' < t_e$ , cette température  $t_e$  diminue, devient  $t'_e < t_e$  et finalement le tout est de savoir si le facteur  $(t'_e - \mathcal{E}_m)$  multiplié par le facteur exponentiel  $e^{-\frac{\kappa q L}{P' e}}$  donne un résultat sensiblement égal à l'ancien facteur  $(t_e - \mathcal{E}_m)$  multiplié par le premier facteur exponentiel  $e^{-\frac{\kappa q L}{P e}}$ .

Dans le cas où le produit

$$(t'_e - \mathcal{E}_m) e^{-\frac{\kappa q L}{P' e}} \quad \text{est plus petit que} \quad (t_e - \mathcal{E}_m) e^{-\frac{\kappa q L}{P e}}$$

le tirage est réduit par suite de la diminution qui en résulte pour  $T_s$  et  $T_m$ ; s'il y a égalité le tirage ne varie pas; si le premier produit est supérieur au second, le tirage est amélioré. Tout est donc question d'espèce.

Étant donné  $P$  et  $t_e$ , le poids et la température d'entrée des gaz primitivement évacués,  $P'$  et  $t'$ , le poids et la température de l'air ajouté, on a :

$$t'_e = \frac{P t_e + P' t'}{P + P'} = \frac{P t_e + P' t'}{P''}$$

avec  $P'' = P + P'$ .

La relation de l'ensemble des deux facteurs précédents se présente donc sous la forme :

$$\left( \frac{P t_e + P' t'}{P''} - \mathcal{E}_m \right) e^{-\frac{\kappa q L}{P' e}} \geq (t_e - \mathcal{E}_m) e^{-\frac{\kappa q L}{P e}}$$

On voit immédiatement que si le deuxième terme :  $e^{-\frac{\kappa q L}{P e}}$  du deuxième membre est pratiquement nul, et il en est ainsi dans notre cas, ceci amène le deuxième membre tout entier à l'être; en supposant que le premier terme du premier membre le devienne, c'est-à-dire que la température  $t'_e$  arrive à être égale à  $\mathcal{E}_m$  (par un afflux d'air considérable à la température  $t'$ ), le résultat sera pratiquement inchangé.

D'un autre côté, la quantité d'air alors introduite étant très grande, le deuxième facteur de ce premier membre aura une valeur importante. Il en résultera finalement une prépondérance du premier terme sur le deuxième, donc plutôt une amélioration du tirage si la température  $t'$  de l'air admis se trouve supérieure à  $\mathcal{E}_m$ , auquel cas le moindre excès se traduira par une valeur finale de  $T_s$  et  $T_m$  des plus sensibles.

Il n'en serait pas ainsi évidemment si  $e^{-\frac{\kappa q L}{P e}}$  n'était pas pratiquement nul, car toute admission d'air diminuerait alors les températures  $T_m$  et  $T_s$  et diminuerait le tirage;

mais comme  $e^{-\frac{\kappa q L}{P e}}$  est pratiquement nul dans notre cas, le résultat est que cette admission d'air améliore le tirage.

La chose a été pratiquement montrée au VI<sup>e</sup> Congrès par notre regretté collègue M. MARTEL qui, après de nombreuses expériences et des essais faits aux Arts et Métiers, est venu exposer un dispositif permettant de maintenir et d'améliorer le tirage des appareils de chauffage à feu fermé à combustion réglable menés au ralenti par une admission dans le conduit d'air chaud pris au voisinage même de l'appareil de chauffage (fig. 8).

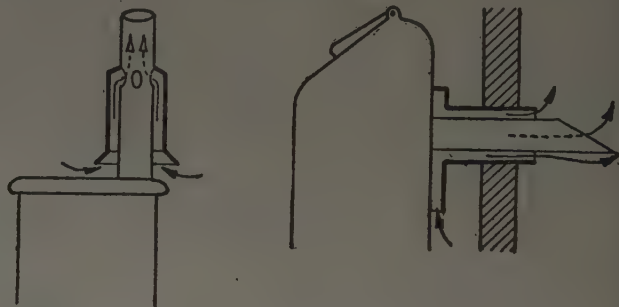


FIG. 8. — Dispositifs Martel.

Son exposé, bien qu'il fût appuyé sur les résultats des essais qu'il avait réalisés aux Arts et Métiers, a laissé nombre de gens sceptiques, y compris moi-même, personne ne voulant admettre un semblable résultat étant donné l'idée que nous avions que toute introduction d'air dans un conduit ne pouvait que couper le tirage et gêner le fonctionnement des appareils. Tous les systèmes de coupetirage n'étaient-ils pas là pour nous confirmer dans cette idée ?

Les résultats sont cependant là et l'étude mathématique de la question montre qu'il avait entièrement raison. L'examen du résumé de ces essais réalisés le même jour les uns après les autres dans les mêmes conditions atmosphériques est absolument probant (fig. 9).

ADMISSION D'AIR	SANS	AVEC	SANS	AVEC	OBSERVATIONS
Température	32°	45°	< 30°	45°	
Dépression en millimètre d'eau.	0,07	0,21	Var { + 0,05 - 0,04	0,16	Sans admission l'appareil refoulait par moment, aussitôt l'admission mise le tirage se rétablissait.
Vitesse {	Max. + 0,9 Min. - 1,1 Moy. ....	+ 1,2 + 0,8	+ 0,9 - 0,8 .....	- - + 0,7	

FIG. 9. — Résultats d'essais faits au Conservatoire des Arts et Métiers, avec le dispositif de M. MARTEL, sur un appareil à combustion réglable mené au ralenti.

Et il y a en effet encore à ce phénomène une explication complémentaire.

Celle-ci se tire de la formule même du tirage émanant de la théorie de M. le professeur VERON.

La vitesse de sortie d'un conduit de fumée qui est donnée par la formule suivante appelée couramment la formule du tirage :

$$V_s = \sqrt{2g \frac{H(\gamma_e - \gamma_m) - d}{\gamma_m(1 + R)}} = \frac{P}{3600\Omega_s\gamma_s}$$

dans laquelle :

$$\gamma_e = \frac{\gamma_0}{1 + \alpha_e} \quad \gamma_m = \frac{\gamma_0}{1 + \alpha T_m} \quad \gamma_s = \frac{\gamma_0}{1 + \alpha T_s}$$

sont les poids spécifiques du mètre cube d'air aux différentes températures extérieure  $\theta$ , intérieure moyenne dans le conduit  $T_m$ , et à la sortie de celui-ci  $T_s$ ,  $H$  est la hauteur du conduit en mètre,  $d$  la dépression régnant au bas du conduit en millimètre d'eau,  $R$  la somme des résistances du conduit.

On voit immédiatement que plus  $d$ , qui correspond à la résistance de l'arrivée de l'air à la base du conduit sera petite, plus la vitesse  $V_s$  sera grande; c'est-à-dire que si le conduit est largement ouvert à la base et si la pièce où il débouche se trouve en communication directe par de grandes ouvertures avec l'extérieur,  $d$  sera pratiquement nul et la vitesse  $V_s$  sera maximum, tandis que si le conduit est fermé à la base, ce qui correspond à une valeur de  $d$  infinie, la vitesse sera nulle, de même qu'elle serait nulle si le conduit était fermé par le haut, ce qui amènerait  $R$  à être infini.

Supposons notre conduit branché sur notre appareil, sans aucune possibilité d'entrée d'air autre que par celui-ci, plus nous fermerons le régulateur, plus nous allons augmenter la résistance de l'arrivée de l'air à la base du conduit et, en conséquence, plus nous allons diminuer la quantité des gaz produits, leur température (voir courbes caractéristiques) ainsi que la vitesse  $V$  qui en dépend, et la température moyenne régnant dans le conduit. Toutes ces variations aboutissent en définitive à une réduction du tirage.

Si nous permettons à de l'air de la pièce de rentrer directement dans le conduit, l'air arrivant au pied du conduit aura beaucoup moins de résistance que l'air passant à travers l'appareil,  $d$  sera donc diminuée, et si la température moyenne, ainsi que nous l'avons montré, ne change pratiquement pas, la vitesse se trouvera augmentée par le fait de la diminution de la dépression  $d$ , puisque nous avons substitué à celle-ci une dépression  $d' < d$ , et elle le sera à fortiori si la température moyenne se trouve elle-même augmentée,  $\gamma'_m$  étant plus petit que  $\gamma_m$ . Et la chose n'est pas nouvelle, car j'ai trouvé dans le *Traité de chauffage* de DENFER (1896) le dessin d'un poêle, alors courant, comportant un dispositif analogue, ce qui prouve que la question n'avait pas échappé à son constructeur (fig. 10).

Et ceci nous donne le moyen d'empêcher le bistre de se produire.

Pour empêcher toute condensation dans un conduit, il est indispensable que de l'air entre dans celui-ci d'une façon telle que les gaz y circulant soient en quantité

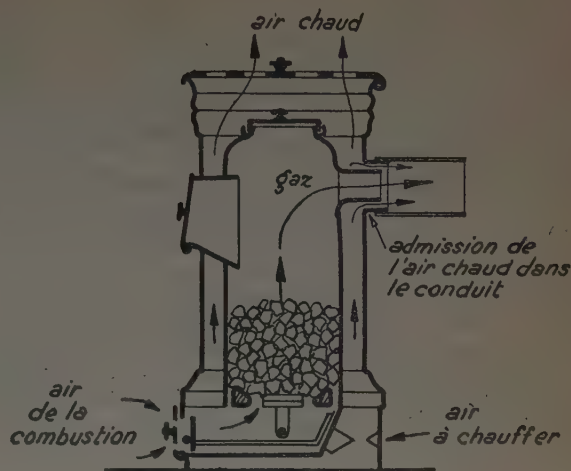


FIG. 10.

suffisante pour ne pas pouvoir atteindre leur point de rosée tant qu'ils sont dans le conduit; mais aussi, afin d'empêcher toute diminution du tirage, il faut que cet air soit suffisamment chaud pour ne pas apporter de baisse à la température moyenne de ces gaz dans le conduit.

Pour ce faire, il est donc indispensable de prendre cet air où il est le plus chaud, donc à proximité de l'appareil, ou bien même à la rigueur, à la partie haute de la pièce où règne généralement une température plus élevée, mais il faut aussi que cet air arrive avec le moins de résistance possible, c'est-à-dire qu'il soit amené auprès de l'appareil par un conduit de ventouse suffisamment grand pour qu'il puisse y arriver facilement et sans résistance et non par les interstices des portes et des fenêtres sur lesquels on a beaucoup trop l'habitude de compter avec une insouciance effarante, ceux-ci étant insuffisants et étant, aussitôt qu'ils remplissent cette fonction convenablement, immédiatement obturés par des bourrelets pour éviter la gêne des vents coulis qui en résultent.

Il est indispensable de plus de munir le conduit d'un aspirateur anti-refoulant, ainsi qu'il est prescrit pour le fonctionnement correct des appareils à gaz munis d'un coupe-vent, afin d'éviter tout refoulement qui pourrait provenir des surpressions créées par des vents plongeants ou soufflant en rafales. Ces surpressions sont capables de créer des courants en sens contraire du tirage et par conséquent de paralyser ou d'annuler celui-ci pour peu qu'elles soient importantes. Déjà gênante par grand vent dans le cas des cheminées à feu ouvert, la vitesse du contre-courant peut être notablement supérieure à la vitesse de sortie résultant du tirage pour les appareils qui nous intéressent dont le régime d'écoulement laminaire est faible (fig. 11).

Il faut naturellement que cet aspirateur soit placé dans une région où il ne règne aucune surpression, sans quoi il ne pourrait pas fonctionner.

Ainsi installée, cette admission d'air directe dans le conduit ne présente aucun danger et ne peut que donner toute satisfaction. Il est cependant recommandable que

cette admission d'air puisse, le cas échéant, être fermée au moment de l'allumage où aucun tirage n'a encore été amorcé, de même que pour la marche aux allures vives où la quantité de gaz et leur température étant alors suffisantes, il n'y a plus aucun intérêt à introduire de l'air dans le conduit.

Cette admission d'air est indispensable avec les appareils actuels pour éviter le bistrage et assurer la continuité du tirage.

Pour montrer son importance, je ne citerai qu'un exemple, mais il est typique.

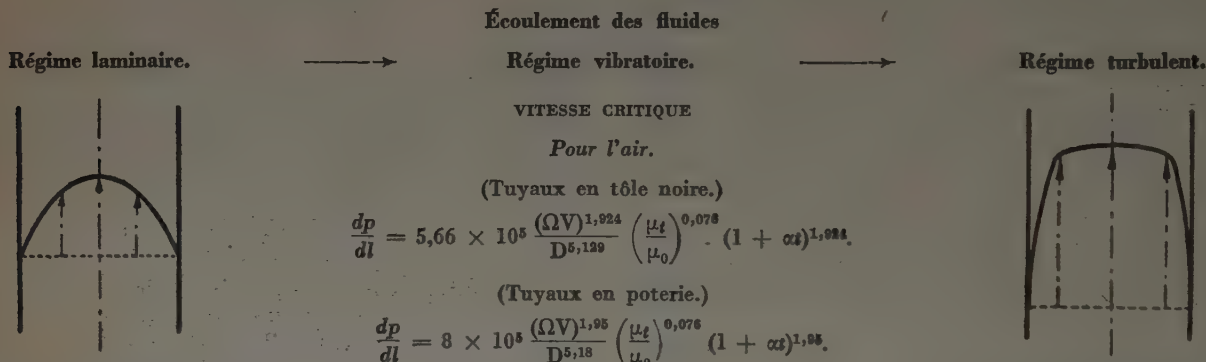
Aux environs de Paris, dans un ensemble de deux cent cinquante petites maisons semblables, étaient utilisés des appareils de chauffage à feu continu, à combustion réglable, comportant au départ de leur conduit de fumée une petite porte coupe-tirage; dans toutes celles où ces portes coupe-tirage ont été ouvertes, aucune détérioration

par le bistre ne s'est produite, alors que dans toutes les autres où, par inadvertance et insouciance, les mêmes portes avaient été laissées fermées, les conduits de fumée ont été bistrés et ont donné lieu à des ennuis considérables.

Je n'insisterai pas davantage, d'autant qu'en ce qui concerne les appareils à gaz, cette admission d'air, après avoir été reconnue indispensable pour les mêmes raisons, est maintenant admise et imposée. (*Voir Code des Conditions minima des Installations au gaz de ville.*)

J'estime donc qu'il n'y a plus rien à ajouter, si ce n'est ceci : une observation m'ayant été faite dernièrement par des personnes ne voyant pas très bien la question, je précise qu'il ne faut pas confondre cette admission d'air avec un régulateur de tirage.

Un régulateur de tirage sert à empêcher le tirage de devenir trop important et n'entre en action que lorsque



La courbe représentative de la vitesse aux divers points est une parabole.

$$\text{Gradient} = \frac{dp}{dl} = \frac{32\mu V}{D^2}$$

= gradient turbulent avec  $n = 1$   
car  $\omega = \gamma_0$ .

VITESSES CRITIQUES (d'après FONVILLE.)

D	0,10	0,15	0,20
20°	0,28 m	0,23 m	0,18 m
100°	0,54 m	0,42 m	0,34 m
200°	0,67 m	0,50 m	0,40 m

La courbe représentative de la vitesse aux divers points est plus aplatie.

$$\text{Gradient} \frac{dp}{dl} = 2A \left( \frac{\mu}{VD\gamma} \right)^4 \frac{\omega}{g} \frac{V^3}{D}$$

$n$  varie avec la rugosité de la paroi  
 $0 < n < 0,250$ .

$$\frac{\mu}{VD\gamma} = \text{Nombre de Reynolds.}$$

Comparer ces chiffres avec ceux de la figure 9 ainsi qu'avec ceux ci-dessus résultant du débit de gaz passant dans un conduit de fumée avec la combustion de 0,500 kg de bois à l'heure dans un poêle ayant 70 % de rendement (1 000 calories) correspondant à un poids d'air de cinq fois celui strictement nécessaire, soit :

$$\frac{4,567 \text{ kg}}{2} \times 5 + 1 = 12,015 \text{ kg donnant } 9,23 \text{ m}^3 \text{ à } 0^\circ \text{ et } 14,67 \text{ m}^3 \text{ à } 150^\circ$$

	$\phi = 0,10$	$\phi = 0,15$	20 × 20
20°	0,035 m	0,016 m	0,007 m
100°	0,044 m	0,020 m	0,009 m
150°	0,055 m	0,025 m	0,011 m

alors que dans une cheminée à feu ouvert étant donné que pour avoir les mêmes 1 000 calories il faudrait brûler 5 kg de bois demandant 500 m<sup>3</sup> d'air évacués à 90° dans le conduit de 20 × 20 la vitesse serait de 3,45 m.

N. B. — L'équation de BERNOULLI n'est d'autre part pas applicable aux vapeurs saturées, car du fait de la condensation la masse du fluide ne reste pas constante.

FIG. 11.

celui-ci dépasse certaines limites en permettant à l'air d'entrer dans le conduit; un semblable appareil se trouve en conséquence régulièrement fermé quand le tirage se trouve insuffisant, tandis que notre admission d'air introduit au contraire l'air dans le conduit quand ce tirage est insuffisant, et ce pour le rétablir, mais elle l'introduit alors dans des conditions tout autres qu'un régulateur de tirage.

Le régulateur de tirage abaisse la température des gaz considérablement par une admission d'air à une température inférieure à la température moyenne, alors que notre admission d'air, pour peu qu'elle soit bien établie, a plutôt tendance à augmenter cette température, étant donné qu'elle y introduit de l'air à une température plus élevée que la température moyenne des gaz régnant alors dans le conduit au moment où elle est effectuée. La différence est considérable et elle explique tout.

## Appareils spéciaux.

Nous voici donc avec un moyen sûr et efficace d'empêcher le bistre de se produire; d'autres moyens peuvent aussi naturellement être employés, tels que ceux qui consistent à faire pénétrer de l'air dans l'appareil même, soit sous forme d'air secondaire ou tertiaire, soit par des canaux supplémentaires établis autour du foyer où cet air est alors fortement chauffé, comme dans les appareils fumivores et dans certains appareils à bois de fabrication suisse et suédoise où la combustion de ce genre de combustible a été tout particulièrement étudiée.

Il peut être aussi établi des appareils où la condensation s'effectue à l'intérieur même de ceux-ci ou à leur sortie, et les gaz sont ainsi débarrassés de leur vapeur d'eau et des produits de distillation, puis réchauffés avant d'être envoyés dans le conduit de fumée pour que le tirage puisse s'effectuer; mais ces appareils sont beaucoup plus compliqués et demandent des installations d'évacuation d'eau difficiles à installer sur des appareils tels que les simples poêles, jusqu'à présent considérés comme des appareils portatifs, voire même sur certains appareils mobiles, c'est-à-dire facilement transportables excluant toute installation fixe accessoire.

Par contre, elles peuvent se concevoir pour des appareils d'une puissance plus grande, pratiquement alors établis à demeure d'une façon définitive.

Il en est de même des appareils à recyclage de fumée qui sont aussi un moyen d'éliminer sinon la vapeur d'eau, tout au moins les goudrons et les suies, c'est-à-dire ce qui peut être gênant, en assurant leur combustion par un repassage des gaz dans le foyer même, mais ceci sort du domaine des appareils domestiques et, de ce fait, de ce qui peut nous intéresser plus particulièrement aujourd'hui.

## Comment en réparer les dégâts ?

Ayant un moyen d'éviter la production du bistre, comment réparer les dégâts occasionnés par celui-ci ?

Quels sont tout d'abord ces dégâts ?

1° Des taches jaunes, bistres, noires, indélébiles sur les

murs, donnant une odeur âcre, pénétrante, désagréable, entêtante, insupportable.

2° Des boursouffures du mortier des joints.

3° Des coulures sales le long des conduits métalliques, provenant des emboîtages de ceux-ci quand ils sont faits petit bout en avant avec pente ascendante vers l'évacuation, et des salissures par projection de ce bistre sur les murs et tous objets environnants.

4° La corrosion des tuyaux métalliques par les produits acides contenus dans le bistre.

5° La corrosion de certaines parties des appareils mêmes.

Nous supposons tout d'abord qu'une fois la réparation effectuée, toutes précautions étant prises pour que le bistre ne se produise plus et aucune crainte ultérieure n'étant à avoir de ce côté, la réparation ne consiste qu'en la suppression des dégâts occasionnés sans qu'il y ait à se préoccuper de mettre en œuvre aucun moyen de protection contre le bistre qui pourrait à nouveau se produire.

En ce qui concerne les taches, l'expérience prouve que le simple plumage des enduits et leur réfection ne donnent que des déboires, le plâtre, le ciment, etc... mis à la place de celui qui était taché s'imprégnant de bistre presque aussitôt par pompage du bistre existant dans les matériaux sous-jacents conservés, et les taches que l'on pensait supprimer réapparaissent au bout de peu de temps; aussi, en général, pour ne pas avoir ces déboires, enlève-t-on complètement tous les matériaux imprégnés en refaisant entièrement le conduit dans tous les endroits où les taches se sont produites.

Certains architectes, devant la dépense qu'entraîne une telle réfection, et en particulier en ce moment où les matériaux nécessaires à celle-ci sont à peu près introuvables, ont pensé pouvoir trouver une solution, soit en enduisant les matériaux sous-jacents (après enlèvement de l'enduit taché) de plusieurs couches de peintures hydrofuges résistant à la chaleur ou d'un enduit plastique imperméable, soit en les recouvrant d'un matériau non poreux (*ardoise, fibro-ciment*) ou d'une mince feuille de métal, et en refaisant ensuite l'enduit par-dessus.

Les résultats n'ont pas paru être mauvais jusqu'à présent, mais il y a trop peu de temps que ces travaux ont été effectués pour que l'on puisse dire exactement ce qui peut résulter d'une semblable réparation et ceci pour la raison qu'il n'est pas du tout certain que, du fait que le matériau sous-jacent ne peut pas être recouvert dans son entier par ces peintures, enduits, matériaux non poreux, feuilles de métal, etc., le bistre ne réapparaîtra pas par pompage de celui qui existe dans les parties qui se trouvent ne pas avoir été remplacées ni recouvertes.

D'autre part, si au point de vue des taches, ce moyen a paru jusqu'à présent donner satisfaction, il n'en est pas de même en ce qui concerne les odeurs qui, dans bien des cas, ont malgré tout continué à se faire sentir, évidemment d'une façon atténuée, mais qu'il y a à craindre de voir s'aggraver, surtout si le conduit est remis en fonctionnement (en raison de la différence des températures qui existera alors entre l'intérieur et l'extérieur du conduit). Si cette réparation peut à la rigueur donner satisfaction

quand il n'y a plus production de bistre, il ne faut rien en attendre de bon si cette production se renouvelle, car l'imprégnation des matériaux par celui-ci, suit le même processus que leur imprégnation par l'humidité. Si à la rigueur, on réussit par ce moyen à garantir l'endroit taché, de nouvelles taches ne tardent pas à se produire au-dessus, ou au-dessous, ou sur les côtés (comme lorsque, pour protéger une partie de mur contre l'humidité, on a recouvert celle-ci d'un matériau imperméable, l'humidité ressort alors au delà de ce matériau), il y a là un phénomène d'osmose bien connu.

Un autre inconvénient d'une semblable réparation, surtout si elle est faite avec l'emploi d'un matériau non poreux et d'une feuille de métal, est que si jamais il se produit un feu de cheminée, l'enduit venant alors à être crevassé, si l'on fait intervenir la Compagnie d'Assurances au cours des sondages qui seront alors faits, aussitôt qu'il sera constaté l'existence de ces matériaux non poreux ou de cette feuille de métal, il en sera déduit que cette réparation n'a été faite qu'à la suite d'un feu de cheminée précédent, pour ne pas avoir à remplacer le conduit et, tout naturellement, la Compagnie d'Assurances se refusera à toute indemnité.

Il semble que, de ce côté, en déclarant par avance à la Compagnie d'Assurances la réparation qui va être faite, la raison pour laquelle elle est effectuée, et en la priant, le cas échéant, de venir constater que la réparation n'est pas le camouflé d'un conduit crevassé, les choses puissent être mises au point et, à fortiori naturellement, si ce genre de travail est fait sur un matériau neuf lors de la construction ou de la réfection du conduit.

Pour éviter la trop grande porosité des conduits dans le cas de remplacement des parties abîmées, il serait intéressant d'employer des matériaux moins poreux que ceux généralement employés, surtout dans la région parisienne, où la poterie de 5 et la poterie de 3, ainsi que la brique dite « de Vaugirard » sont des matériaux véritablement lamentables à ce point de vue.

L'emploi de produits de qualité en terre cuite, serrée, bien cuite et ensuite silicatée par immersion, permettrait

d'avoir de meilleurs résultats; encore ne serait-ce qu'un pis-aller car, en ce qui concerne la construction des conduits, il faudrait employer une tout autre méthode ainsi que nous allons le montrer ultérieurement.

Il en est de même des tuyaux en fibro-ciment attaqués par le bistre qui eux, s'ils sont imprégnés dans toute leur masse, doivent être changés, étant donné alors le mauvais état où ils se trouvent dans toute leur épaisseur du fait même de la façon dont ils sont fabriqués.

Ces conduits résistent généralement mieux à la pénétration du bistre, mais ils ne sont cependant pas complètement à l'abri de toute pénétration de celui-ci et de nombreux exemples prouvent qu'ils sont loin dans l'état actuel de donner entière satisfaction.

En ce qui concerne les joints, leur réfection complète s'impose d'autant plus que les matériaux qui les constituent sont non seulement imprégnés, mais ont souvent complètement changé de composition, ce qui ne leur permet plus de jouer le rôle qu'ils doivent remplir.

Les coulures extérieures provenant des tuyaux métalliques peuvent être évitées par la pose de ces tuyaux grand bout en avant dans le sens de la pente ascendante vers l'évacuation et par l'emploi d'un liant plastique, non soluble, dans l'emboîtement des différents éléments.

La corrosion des parties métalliques peut être évitée par l'emploi de matériaux moins attaquables que le fer tels que la fonte, le cuivre, ou mieux l'aluminium, ou par la peinture intérieure des tuyaux ou l'emploi de tuyaux émaillés ou de matériaux tels que le grès.

La corrosion des appareils eux-mêmes peut être évitée par l'emploi de la fonte au lieu de la tôle.

Quant aux éclaboussures des façades et des toitures par les particules de bistre sortant des cheminées, le seul moyen de les faire disparaître est de remplacer les parties salies puis d'éviter la production du bistre, car s'il s'en produit à la sortie du conduit, ses gouttelettes étant entraînées par le vent, rien ne permet de les arrêter, et elles viennent souiller tous les objets sur lesquels elles tombent.

## SUIE

La suie, nous l'avons déjà dit, provient d'une part du carbone volatil, non brûlé, se déposant soit sous forme pulvérulente sur les parois froides du conduit de fumée, soit sous forme d'agglomérat avec les goudrons et résines condensés et, d'autre part, des particules de combustible non brûlées ou des particules de coke et de mâchefer provenant de la combustion et des matières inertes (cendres) que contient le combustible et qui sont entraînées par les gaz sous l'influence du tirage.

Cette suie, par elle-même pratiquement incombustible, se dépose dans les endroits où la vitesse se trouve réduite, c'est-à-dire dans les coudes et les élargissements du conduit; elle est aussi en grande partie rejetée au dehors où elle se répand et gêne souvent considérablement le voisinage.

Certaines de ces particules s'accrochent cependant aux

parois mêmes des conduits, surtout quand la vitesse des gaz est faible, et s'y accumulent sous forme de moutons composés de ces particules, de goudrons, de résines et de poussières grasses, combustibles, des plus inflammables et sont cause, de ce fait, avec le calcin de feux de cheminée.

L'enlèvement de ces suies doit donc être fait pour éviter les feux de cheminée, — de même que celui des suies déposées dans les coudes et tuyauteries pour en empêcher l'obstruction, — par un ramonage assez fréquent de tout l'ensemble de l'installation.

La quantité de suie produite par kilogramme de combustible varie avec celui-ci et avec la façon dont il est brûlé; elle peut aller jusqu'à 10 % du poids du combustible brûlé.

L'inconvénient provenant du déversement des suies dans l'atmosphère peut être, sinon totalement évité, tout au moins très atténué par l'emploi soit de foyers fumivores, soit de dépoussiéreurs capte-suies établis en fonction de la quantité et de la température des gaz à traiter, du combustible utilisé et du genre d'appareils où il est brûlé.

Les premiers évitent la formation des suies par une combustion rationnelle des combustibles, les seconds arrêtent celles qui ont pu se produire.

Pour ces derniers, le volume et la viscosité des gaz étant d'autant moindres que la température est plus faible (fig. 12), leur meilleur emplacement est au sommet du conduit; placés à cet endroit ils n'apportent pratiquement aucune gêne au tirage, s'ils sont bien conçus et convenablement calculés, et leur fonctionnement n'est aucunement perturbé par le tirage; au contraire, lorsqu'ils sont placés à la base ou sur le parcours même des conduits, leur fonctionnement est gêné par le tirage et, pour y remédier, il faut alors employer des appareils beaucoup plus importants et de ce fait plus coûteux.

Construits en maçonnerie, ils valent naturellement mieux qu'en tôle, n'étant pas périssables et ne demandant aucun entretien. Ils peuvent de plus être établis en harmonie avec l'architecture des immeubles et coûtent moins cher s'ils sont établis lors de la construction du bâtiment.

Ces appareils sont indispensables avec les foyers mécaniques, avec les appareils à soufflerie, où, malgré la combustion fumivore qui normalement s'y opère, un entraînement important de poussières et d'imbrûlés se produit, de même qu'avec les brûleurs à huile lourde d'où s'échappent de nombreux petits flocons de suie grasse pour peu que les brûleurs ne soient pas réglés comme il convient pour le genre d'huile employée. Ils sont également nécessaires avec les fourneaux de cuisine de restaurants, de charcutiers, avec les fours de boulangerie, etc..., d'où sortent, du fait des combustibles employés et des déchets qui y sont souvent brûlés, des fumées noires des plus gênantes pour le voisinage, quelle que soit la hauteur à laquelle se trouve le débouché des conduits qui les desservent.

Il ne faut pas confondre, malgré la similitude de noms, le calcin des conduits de fumée avec le calcin des pierres qui est une croûte formée à la surface de celles-ci par l'action de l'acide carbonique sur le calcaire dont elles sont constituées, non plus qu'avec les débris de verrerie broyée pour la fabrication des émaux, ni avec le poudingue provenant de la calcification de certaines alluvions. Et chacun peut conserver cette désignation sans qu'il en résulte plus d'inconvénient que pour les Canons de l'Église et les canons d'artillerie.

Celui qui nous occupe est formé des goudrons de la série lourde, des résines et de la suie agglomérée avec eux ou collée sur eux, qui du fait que leur condensation est plus rapide que celle de la vapeur d'eau et des produits composant le bistre, se déposent sur toutes les parois des conduits

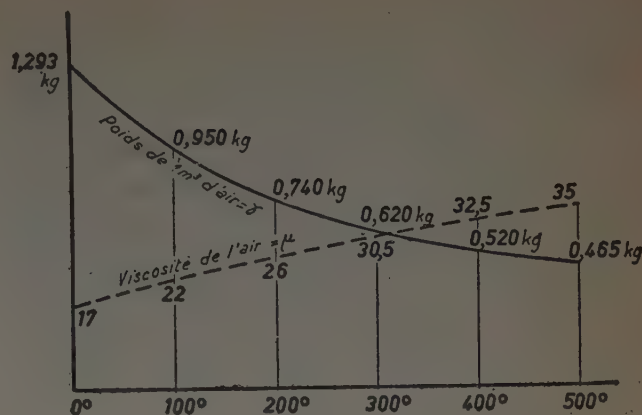


FIG. 12.

Poids spécifique  $\gamma_t$  et viscosité de l'air  $\mu_t$

$$\gamma_t = 1,293 \text{ kg} \frac{273}{273 + t}$$

$$\mu_t = 1,660 \cdot 10^{-7} \frac{387}{387 + t} \left( \frac{273 + t}{273} \right)^{3/2}$$

La prudence demande d'en munir dans les constructions toute cheminée sur laquelle est branché l'un quelconque des appareils que nous venons de citer, de même que toutes celles qui sont destinées à des foyers industriels pour lesquels la loi sur les évacuations de suie, poussières, fumées et gaz nocifs, dite loi MORIZET, en fait une obligation.

Ayant déjà traité par ailleurs des problèmes de la fumivorté et du dépoussiérage, je renverrai ceux que la question intéresserait plus particulièrement, aux différentes conférences que j'ai déjà faites sur ce sujet, et notamment à celle faite en 1933, 100, rue du Cherche-Midi et à celle intitulée *De Caminorum farina* faite en 1923 à l'Association des Ingénieurs de Chauffage et Ventilation de France.

## CALCIN

dans les premières parties de ceux-ci, voire dans le raccordement même des appareils.

Le calcin fond aux environs de 130° et est éminemment combustible.

Fortement collé sur les parois des conduits sous la forme d'un vernis noir et dur, il résiste au hérisson, à la raclette et même au burin et ne peut être enlevé que par le feu.

Ce dernier ne peut malheureusement être utilisé que pour les tuyaux métalliques dont le brûlage peut se faire après démontage, sans inconvénient ni danger, si ce brûlage est fait dans un endroit convenable.

Il ne peut être employé pour les conduits en maçonnerie des immeubles, car les matériaux de ceux-ci ne résistent pas à l'élévation de la température qui résulte de la com-

bustion à leur contact de ce calcin qui les enduit, cette température atteignant 1 000° et occasionnant dans le sein même de ces matériaux des différences de dilatation considérables qu'ils ne peuvent pas supporter.

Tous les matériaux actuellement utilisés dans la construction des conduits de fumée : poterie, brique, ciment, mortier, plâtre, etc... se fendent presque instantanément (quelques minutes) sous cette différence de température et ce, quelle que soit leur épaisseur, pour peu que le feu de cheminée soit un peu intense, c'est-à-dire que le calcin y soit en suffisamment grande quantité et que le feu soit bien pris, car il se produit alors comme un véritable coup de chalumeau dans toute la longueur du conduit, et la flamme sort de celui-ci avec une colonne de fumée s'élevant à une hauteur parfois de plusieurs mètres, en même temps qu'il se répand une odeur âcre de goudron et de résine brûlés des plus caractéristiques.

Ces goudrons et résines étant plus particulièrement produits dans la combustion du bois et des agglomérés au brai de houille (*briquettes, boulets*), c'est avec ces combustibles que les feux de cheminée se produisent, de même que dans les conduits desservant les fourneaux de cuisine et les ventilations de ces derniers où se déposent des poussières graisseuses des plus inflammables, et dans les cheminées des fours de boulangerie où se trouvent déposées des poussières de farine alcoolisées par la fermentation qui se produit au cours de la confection du pain.

L'enlèvement du calcin déposé à même les maçonneries étant quasi-impossible, toute cheminée enduite de celui-ci risque d'être le siège, un jour ou l'autre, d'un feu de cheminée.

Pour l'éviter il faut :

1° empêcher que la flamme des foyers ne vienne lécher ce calcin, le ramollir et l'enflammer et, pour ce faire, prendre les précautions nécessaires pour que la combustion ne fasse pas de longues flammes;

2° enlever par un ramonage soigneux tous les moutons de suies qui peuvent se trouver dans le conduit et pourraient être enflammés par des escarbilles en ignition;

3° enduire toutes les parties qui peuvent être atteintes par les flammes d'un badigeonnage à la terre à four afin d'éviter le contact direct de ces flammes avec les parties recouvertes de calcin.

Ce badigeonnage à la terre était courant autrefois et se faisait avec un sac enduit de terre humide que l'on faisait passer plusieurs fois dans le conduit (en le tirant par une corde) alternativement de bas en haut et de haut en bas, tandis que l'on versait par le haut de la terre à four bien liquide.

L'intérieur de la cheminée elle-même et les goussets étaient badigeonnés directement avec un pinceau, une éponge, un torchon, ou même simplement à la main.

Cet enduit ainsi fait recevait le calcin et la suie et, lors du ramonage suivant, le hérissou détachait tout l'ensemble séché, entraînant avec lui la suie et le calcin qui s'y étaient déposés et qui n'auraient pu être enlevés s'ils s'étaient déposés à même les maçonneries.

Il est regrettable que cette pratique ne soit plus utilisée car elle donnait toutes garanties quand le travail était bien exécuté.

Malheureusement, du fait des salissures qui ne manquaient pas de s'ensuivre dans les pièces où s'opérait ce travail (malgré les soins apportés à son exécution) et, en raison du prix élevé de celui-ci (par suite du temps mis à l'exécuter) peu à peu la pratique s'en est perdue et maintenant il n'est guère possible de penser à la remettre en vigueur, peu d'ouvriers étant disposés à l'exécuter et la mode s'en étant complètement perdue.

Un feu de cheminée s'étant produit et le conduit crevassé, sa réparation à l'heure actuelle consiste dans le remplacement de toutes les parties fissurées, parce que par ces fissures peuvent se produire des émanations dans les pièces traversées par le conduit, il en résulte des travaux de maçonnerie, de menuiserie et de peinture de plus en plus onéreux du fait des hausses que subissent actuellement les matériaux et les salaires, et une gêne considérable dans les locaux où ils sont exécutés, sans compter qu'à l'heure actuelle, par suite de la pénurie des matériaux nécessaires, dans bien des cas, il est pratiquement impossible de les exécuter.

La poterie de 0,05 réglementaire à Paris étant en ce moment à peu près introuvable, devant la nécessité de remettre malgré tout ces conduits en état, les services d'architecture de la Préfecture de Police viennent d'autoriser — par dérogation à l'ordonnance de police de 1906-1917 actuellement en vigueur — l'utilisation provisoire de la poterie de 0,03 (*employée d'une façon générale dans toute la France*) avec un enduit en plâtre de 0,04.

Cela donnera de ce côté un peu plus de facilité, encore que le plâtre étant loin lui-même d'être facile à se procurer, une autre difficulté surgit.

Mais ce n'est pas là encore la véritable solution, car le remplacement des poteries fissurées, qu'il soit fait en poterie de 0,05 ou en poterie de 0,03, aboutit à des travaux similaires avec tous les inconvénients qui en résultent dans les locaux où ils s'opèrent, et si l'on veut vraiment faire cesser ceux-ci c'est d'une tout autre manière qu'il faut alors opérer.

Et cette manière de faire existe et est employée notamment en Suisse, pays sur lequel nous devrions bien prendre modèle pour ce genre de travaux, étant donné les avantages qui en résultent.

La méthode employée consiste à chemiser entièrement le conduit avec un enduit composé de chaux, de ciment et de sable très fin, appliqué sous pression au moyen d'appareils spéciaux, tirés à plusieurs reprises de bas en haut, au moyen d'un treuil à vis placé au-dessus du débouché du conduit par lequel on introduit le produit au fur et à mesure de la montée des appareils compresseurs (fig. 13).

On confectionne ainsi dans un conduit carré ou rectangulaire en brique ou en poterie de 4 dm<sup>2</sup> un conduit rond ou ovale d'une section un peu moindre mais très résistant, très lisse et complètement étanche, donnant à l'usage toute satisfaction, un conduit plus solide que le premier puisque l'épaisseur de celui-ci se trouve augmentée de l'épaisseur du chemisage et ses déficiences complètement bouchées par un matériau des plus serrés, qui peut même être imperméable à l'humidité quand il est ajouté à cet enduit un produit spécial hydrofuge.

Ce procédé s'applique dans tous les conduits verticaux ou inclinés jusqu'à 30° sur la verticale.

Il peut donc être normalement utilisé dans tous les conduits réglementairement construits.

Bien mieux, il a l'avantage que, faite de cette manière, la réparation du conduit n'amène à aucun travail dans les pièces, résultat des plus intéressants, et que de plus, la section du conduit est rendue plus adéquate au fonctionnement correct des appareils actuels pour lesquels la section de 4 dm<sup>2</sup> se trouve trop grande.

Évidemment, ce genre de travail ne peut être envisagé pour les conduits devant desservir des cheminées à feu ouvert, pour lesquels la section se doit d'être dans le rapport de 1 pour 8 avec l'ouverture de cette cheminée, ce qui amène à la section de 4 dm<sup>2</sup> pour la cheminée ordinaire courante à châssis de 50/60, et au conduit de ventouse de 1,5 dm<sup>2</sup>; mais la plupart des cheminées à feu ouvert étant maintenant inutilisées ou non utilisées dans des conditions normales, puisqu'on y branche des appareils à feu fermé à combustion continue réglable par admission d'air, il suffirait dans la plupart des cas de compléter le travail par l'organisation de la cheminée elle-même pour qu'elle ne puisse plus servir directement et que, ne devant plus être utilisée qu'avec des appareils à feu fermé, il soit ainsi évité toute erreur ultérieure à ce sujet.

Il n'y a de ce côté au fond aucune difficulté car la chose se fait déjà couramment pour les poêles de salle à manger,

et il n'en découlerait que des avantages pour le fonctionnement des appareils actuels dont le branchement à travers le tablier de cheminée à la L'HOMEOND est des plus critiquables et ne cesse, chaque fois que la modification de la réglementation actuelle revient en question, d'être considéré comme devant être interdit du fait de la discontinuité qui s'ensuit dans le raccordement de l'appareil avec le conduit de fumée qui doit le desservir.

Il serait souhaitable, pour que ce procédé puisse être utilisé à Paris, que l'ordonnance de police de 1906-1917 exigeant actuellement la section minimum de 4 dm<sup>2</sup> soit modifiée et que cette section soit ramenée à 1,5 dm<sup>2</sup>, pour les tuyaux devant desservir les appareils de chauffage actuels autres que les cheminées à feu ouvert.

Cette section (1,5 dm<sup>2</sup>) doit être aussi envisagée pour les conduits des nouveaux immeubles à construire, pour permettre dans ceux-ci l'utilisation des appareils qui sont maintenant seuls couramment utilisés; le minimum de 4 dm<sup>2</sup> ne doit continuer à être imposé que pour les foyers à feu ouvert où il est alors absolument indispensable, et pour les appareils d'une puissance supérieure aux poêles actuels courants, tels que les chaudières d'appartement, les fourneaux de cuisine, etc..., dont la section du conduit doit être en rapport avec la quantité de combustible horaire brûlé.

Le chemisage des conduits par le procédé indiqué ci-dessus serait une amélioration considérable mais à la condition que celui-ci soit comme en Suisse réalisé correctement. Pour qu'il en soit ainsi il faut absolument que cesse la manière de faire actuelle, qui consiste à toujours vouloir faire les choses au meilleur marché et même au-dessous de leur valeur, ce qui conduit *in fine* à confier leur exécution à des bricoleurs, dont peu à peu les procédés incorrects deviennent d'un usage courant au détriment des exécutants sérieux et de la construction elle-même.

J'ai montré au V<sup>e</sup> Congrès en 1933 par cent cinquante photographies prises dans des bâtiments en construction à quels résultats déplorables aboutissait un semblable état d'esprit pour la construction des conduits de fumée.

Ce chemisage en Suisse est considéré comme ne pouvant être fait, étant donné les soins qu'il demande pour être bien établi, que par des ouvriers qualifiés, sérieux, habiles et attentifs, avec les appareils nécessaires et les matériaux adéquats.

Il ne peut être effectué par n'importe qui et surtout par des individus ne cherchant qu'à aller vite et à triquer. Aussi ne doit-il être pratiqué, comme en Suisse, que par des entrepreneurs agréés, avec des équipes spécialisées et surveillées par un chef qualifié qui examine soigneusement au préalable le conduit, prend les dispositions nécessaires à une bonne exécution et contrôle celle-ci pendant toute sa durée ainsi que les résultats finalement obtenus.

Pour contrôler le résultat, c'est-à-dire l'étanchéité du conduit, il est procédé à un essai de celui-ci, avec de la fumée produite sous une légère pression par des fusées analogues à celles que nous employons ici.

Une amélioration pourrait être apportée aux conditions d'essai des conduits; il existe en effet en France un procédé beaucoup plus précis qu'il y aurait avantage à généraliser.

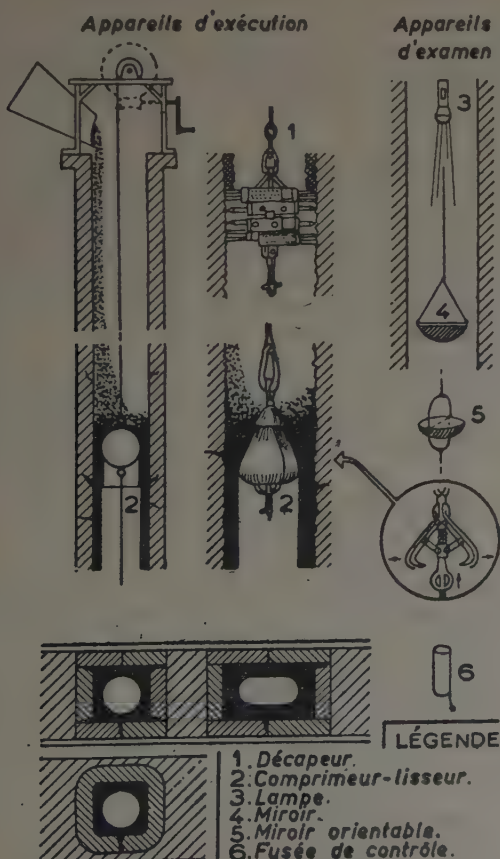


FIG. 13.

Extraits de Recherches et Inventions.

Ce procédé consiste à fixer par des punaises, sur la paroi du parcours à examiner du conduit un papier imprégné d'acétate de plomb, et de remplir le conduit sous une légère pression (1 mm d'eau environ) d'hydrogène sulfuré fabriqué sur place au moyen d'un petit appareil *ad hoc*.

Si le conduit est étanche, le papier à l'acétate de plomb reste tel quel. Si le conduit présente des crevasses, en face de chaque point défailant le papier se teinte en noir, montrant d'une façon parfaite, comme une photographie, tous les endroits où il y a un défaut d'étanchéité, ce qui permet de faire les interventions voulues aux endroits nécessaires.

Ce procédé est dû à M. le professeur BOURGUIGNON et a été mis au point avec lui par feu notre collègue TAUREAU.

Nous sommes donc, de ce côté, armés pour faire le contrôle des conduits d'une façon meilleure qu'avant, et si nous voulons vraiment faire quelque chose de bien nous avons tous les éléments en main pour pouvoir le faire.

Malheureusement, il est à craindre que pour ces travaux où n'importe qui a tendance à faire n'importe quoi, sans même en avoir la compétence, ce soit une fois de plus les charlatans bricoleurs qui soient généralement préférés parce que soi-disant moins chers que les exécutants sérieux.

Et je crains que ce soit ce qui ne manquera pas de se

produire ici si le prix alloué pour ce travail n'est pas ce qu'il doit être, comme cela se passe à présent et s'est toujours passé autrefois pour la réfection des conduits de fumée après les incendies; les prix de série n'ont jamais payé l'ensemble des dépenses engagées par les entrepreneurs pour l'exécution normale de leur remise en état, compte tenu de tous les frais et aléas que ceux-ci ont pratiquement à supporter. Il en résulte que les entrepreneurs sérieux se désintéressent de ces travaux et n'acceptent de les faire que pour les personnes qui acceptent de leur allouer ce qui normalement doit leur revenir.

Les prix de série et les règlements de sinistre par les compagnies d'assurances pour la reconstruction des conduits de fumée ont porté un préjudice considérable à toutes les entreprises sérieuses de fumisterie en même temps qu'aux propriétaires et à tout l'ensemble de la propriété bâtie. (Mon associé, M. MONTARIOL l'a montré d'une façon irréfutable dans une conférence faite à l'Institut Technique en 1940.)

A ce point de vue il y a une sérieuse remise au point à faire; j'aime à espérer que cette question importante sera enfin examinée et résolue, comme il se doit, dans l'intérêt général, et je profite de la présence de nombreux experts d'assurances et de représentants des sociétés d'architectes pour les supplier de bien vouloir le comprendre et de faire l'effort nécessaire pour que cette mise au point ait lieu au plus vite.

## CONSTRUCTION DES CONDUITS DE FUMÉE NOUVEAUX

Voyons maintenant comment constituer un conduit de fumée pour l'empêcher d'être détérioré par un feu de cheminée.

Tout d'abord la chose est-elle possible? Certainement oui; ainsi il y a déjà des solutions pour les tuyaux extérieurs avec l'emploi des tuyaux métalliques auxquels on ne peut que reprocher, d'une part leur détérioration par les produits acides de la combustion et, d'autre part, leur trop grande conductibilité thermique.

En y réfléchissant un peu, quand on voit l'emploi que l'on fait du fer maintenant avec le ciment armé, où ce métal ne paraît subir aucune corrosion, il n'est pas difficile de concevoir des dispositions qui devraient permettre d'éviter à la fois l'un et l'autre de ces inconvénients. Une solution pourrait être trouvée par exemple dans le chemisage intérieur des tuyaux métalliques avec un matériau non poreux, inattaquable aux produits acides et leur recouvrement extérieur avec un enduit mauvais conducteur de la chaleur.

L'emploi d'un seul matériau selon le procédé actuel ne me paraît pas pouvoir donner satisfaction, à moins que ce matériau soit à la fois non poreux et pratiquement sans aucune dilatation dans toute l'échelle des températures, comme le verre à 8,4 % d'oxyde de titane, dont la dilatation a pour valeur  $0,1 \times 10^{-7}$  et est cinquante fois plus faible que celle de la silice vitreuse et que celle du métal invar qui sont toutes les deux du même ordre de grandeur.

Si des tuyaux étaient fabriqués avec une telle substance en une épaisseur suffisante pour éviter la casse par choc,

nul doute que ceux-ci (étant alors des plus lisses, inattaquables aux produits acides, mauvais conducteurs de la chaleur et pouvant résister à celle-ci et même aux coups de feu) puissent donner satisfaction. Malheureusement, le verre est fusible à 1 000° et pourrait être porté à cette température lors d'un feu de cheminée; ce n'est donc pas avec un semblable verre que le problème peut être résolu.

Peut-être d'autres substances nous donneront-elles la solution, car rien n'est impossible; mais je n'y crois guère. Pour le moment il n'y a rien; aucun des matériaux qui ont été proposés jusqu'ici ne répond à l'ensemble de la question.

La solution étant complexe, à mon avis il vaut mieux chercher dans une autre voie.

Nous avons montré dans des conférences faites aux Ingénieurs du chauffage de France, à la Chambre Syndicale des Entreprises d'Installations thermiques et à la Commission Supérieure Consultative du Chauffage, que cette solution semblait plutôt devoir être dans l'emploi de deux matériaux superposés (en dehors de l'enduit) dans un ordre déterminé; les qualités respectives de ces deux matériaux (coefficients de conductibilité, de dilatation, résistance à la compression et à la traction, etc...) devraient être en harmonie. Nous avons également montré, avec mon associé M. MONTARIOL, au VI<sup>e</sup> Congrès du Chauffage et de la Ventilation des locaux habités, quelles devaient être pour chacun de ces matériaux les propriétés correspondantes.

Ayant repris ces études, j'ai été amené à constater qu'il ne fallait pas compter sur le fretage du matériau inté-

rieur par un matériau tel que le ciment armé, car ce n'est pas tant la pression que le premier exerce sur le second par son extension qui peut faire casser celui-ci que sa propre dilatation. Les figures suivantes montrent en effet comment s'opère la propagation de la chaleur dans deux matériaux successifs : dans la première partie de l'élévation de la température c'est le premier matériau qui a le

plus de chances de casser, mais dans la deuxième période si le choix du matériau n'est pas judicieux, c'est le deuxième qui a le plus de chance de se rompre (fig. 14).

En regardant ces figures il est facile de voir la différence qu'il y a entre ce qui se passe lors d'un feu de cheminée et lors d'une élévation de température lente, même quand celle-ci est relativement importante comme dans le cas

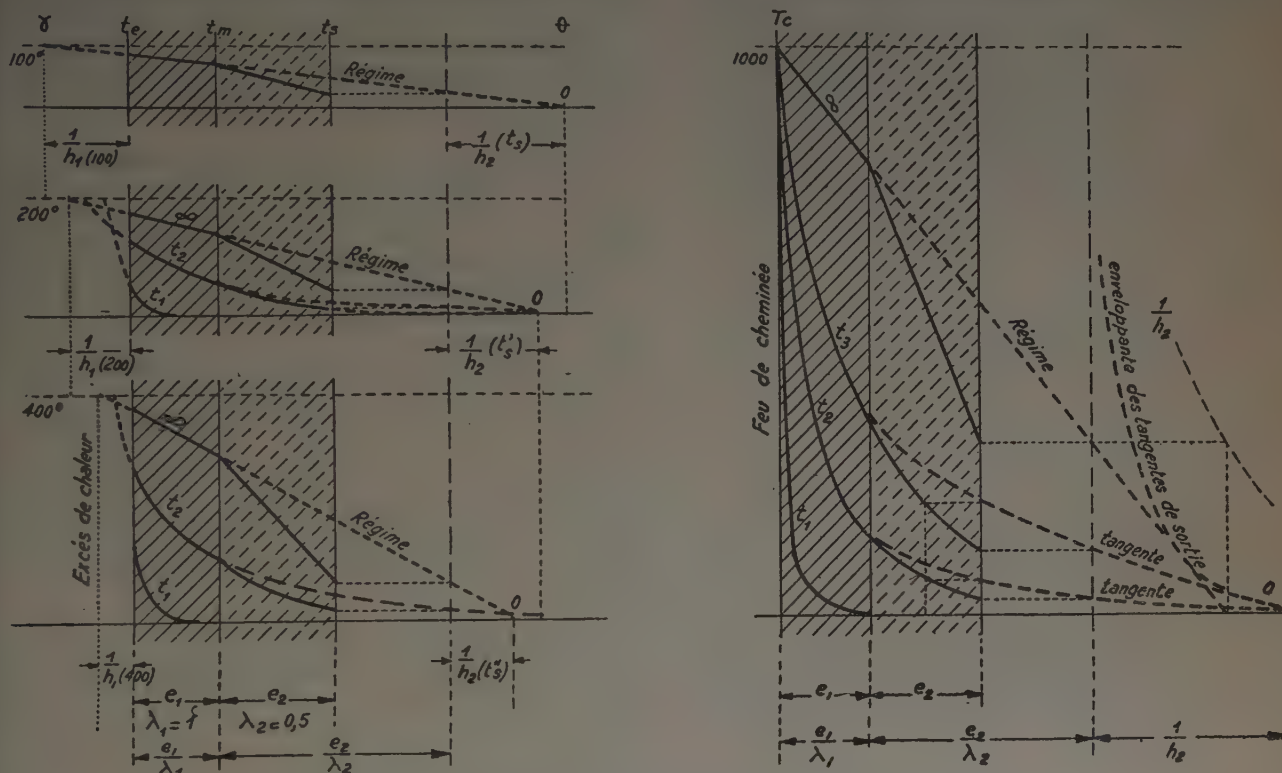


FIG. 14. — Transmission et propagation de la chaleur dans un mur.

$$h_1 = mr + nf \quad h_2 = m'r' + n'f'$$

$$m = 1,077^T \times 124,72 \frac{1,077^{T-t_0} - 1}{T - t_0}$$

$r$  = coefficient de rayonnement de la matière  $e_1$   
 $n = 0,552 (T - T_0)^{0,233}$   
 $f = \left( 1,764 + \frac{0,636}{\sqrt{H}} \right) \sqrt{V}$  (surface plane).

$e$  = épaisseur  $\lambda$  = coefficient de conductibilité.  
 $m' = 1,077^{t_0} \times 124,72 \frac{1,077^{t_0 - \theta} - 1}{t_0 - \theta}$   
 $r'$  = coefficient de rayonnement de la matière  $e_2$   
 $n' = 0,552 (t_0 - \theta)^{0,233}$   
 $f' = \left( 1,764 + \frac{0,636}{\sqrt{H}} \right) \sqrt{V'}$  (surface plane).

$V$  et  $V'$  vitesse de l'air léchant les parois sur la hauteur  $H$ .

TEMPÉRATURE  $\theta_x$  AU POINT SITUÉ A UNE DISTANCE  $x$  DE LA PAROI CHAUDE

Transmission en régime entre deux ambiances à  $T$  et  $\theta$  :

$$\theta = T - \frac{\kappa'}{E'} (T - \theta)$$

$$E' = \frac{1}{h_1} + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{1}{h_3}$$

$$\kappa' = \frac{1}{h_1} + \left\{ \frac{x}{\lambda_1} + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{x - e_1}{\lambda_2} \right\}$$

Propagation dans un mur infini par une face à  $T_0$  :

$$\theta_x = T_0 \left( 1 - \frac{2}{\sqrt{n_0}} \int_0^x \frac{e^{-\frac{x^2}{4at}}}{2\sqrt{at}} e^{-\frac{x^2}{2at}} dx \right)$$

$\lambda$  = coefficient de conductibilité.  
 $a$  = diffusivité =  $\frac{\lambda}{c\gamma}$   
 $c$  = chaleur spécifique.  
 $\gamma$  = densité.

Régime variable  $\theta_x = A + Bx + \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-\gamma_n^2 x} (\cos \omega_n x + D_n \sin \omega_n x)$

des excès de chaleur. On voit que dans ce deuxième cas (élévation de température lente) le matériau intérieur peut parfaitement résister, alors que le matériau extérieur doit céder; c'est ce qui explique les crevasses que l'on aperçoit sur les enduits des conduits de fumée dans lesquels s'est produit une surchauffe et le cloquement de ces enduits, alors qu'après avoir plumé ces enduits crevassés et cloqués on trouve en dessous le conduit en parfait état.

Le frettage d'un conduit peut évidemment, dans certains cas, amener l'un des matériaux à résister et la fissuration à ne se produire que dans l'un d'entre eux; mais ce n'est là qu'un hasard dû à une circonstance particulière; on ne peut en déduire ce qui se serait passé si cette circonstance ne s'était pas présentée; et comme on ne sait pas exactement quelle a été cette circonstance, il est très difficile d'en tirer aucune conclusion et d'affirmer avec certitude qu'une paroi ainsi composée pourra toujours résister.

Le seul frettage susceptible de donner un résultat est le frettage métallique total. Après avoir bien réfléchi à la question, et en tenant compte des divers résultats à obtenir pour qu'un conduit donne réellement satisfaction, à savoir :

1° que le conduit s'oppose à la transmission de l'humidité et du bistré,

2° qu'il résiste à l'action corrosive des produits de la combustion,

3° qu'il résiste à la chaleur et aux dilatations occasionnées par les coups de feu, excès de chaleur et feux de cheminée,

4° que l'ensemble des parois, enduits compris, soit suffisamment mauvais conducteur de la chaleur pour que la transmission de celle-ci à travers ces parois ne soit pas supérieure à celle que l'on obtient avec les conduits actuels et ne constitue pas une gêne dans les locaux traversés par les conduits,

j'ai été amené à considérer qu'un semblable conduit pourrait être ainsi composé :

un tuyau cylindrique constitué d'un matériau réfractaire de 1 cm à 1,5 cm d'épaisseur (comme les conduits de drainage en terre cuite, ceux en fibro-ciment, en grès, en porcelaine, etc...), gainé par un tuyau métallique (zinc, cuivre, aluminium, etc...) constitué d'une feuille de faible épaisseur, soudée, agrafée, ou mieux enrubannée, formant frettage du premier tuyau, et sur cet ensemble un revêtement d'une épaisseur suffisante, d'un matériau mauvais conducteur de la chaleur, matériau suffisamment résistant par lui-même en raison de son épaisseur ou dont la résistance sera renforcée, si cela est nécessaire, par la pose à l'intérieur d'un grillage à larges mailles tel que le grillage hexagonal en fer galvanisé dit « grillage à lapins » (fig. 15).

En voyant la façon dont les

tuyaux de fibro-ciment étaient fabriqués, j'ai été amené à concevoir que la confection de ce conduit amélioré avec deux tuyaux superposés et entre eux le frettage indiqué, pouvait être la solution complète du problème. Les éléments ainsi fabriqués pourraient permettre, par simple décalage longitudinal des deux tuyaux concentriques l'un par rapport à l'autre, non seulement la confection immédiate des emboîtages pour former un conduit sans aucune solution de continuité, mais l'ensemble ainsi constitué permettrait également, le cas échéant, de couper les éléments à la longueur voulue à la scie à métaux, exactement dans les mêmes conditions que ceux actuels.

Quant au prix de ces tuyaux il sera évidemment plus élevé que celui des tuyaux courants en fibro-ciment; mais les tuyaux en fibro-ciment ne résolvent pas le problème, ils ne présentent pas les caractéristiques nécessaires. Étant donné les avantages que les nouveaux tuyaux présenteraient et le peu de dépense supplémentaire qui en résulterait pour la construction, même s'ils coûtaient quatre fois plus cher que ceux en fibro-ciment, j'estime qu'il n'y a pas à hésiter, et ce d'autant moins que fabriqués en très grande série, il n'est pas dit que finalement la différence de prix ne s'atténue très rapidement.

En tout cas ils seront certainement moins chers que les conduits actuels en poterie de 0,05 d'épaisseur (dont les éléments sont de plus en plus chers tout en étant de qualité de moins en moins bonne) du fait que leur mise en place nécessite moins de main-d'œuvre que la mise en œuvre des poteries.

Ces tuyaux fabriqués à un diamètre intérieur de 0,14 m, ce qui correspond à une section de 1,5 dm<sup>2</sup> (section préconisée par le premier Groupe de la Commission Consultative des conduits de fumée après les essais faits aux Laboratoires de la Compagnie du Gaz), pourraient être les conduits normaux à conseiller et à utiliser dans toutes les nouvelles constructions. Ils éviteraient par leur conception tous les inconvénients que nous venons d'examiner.

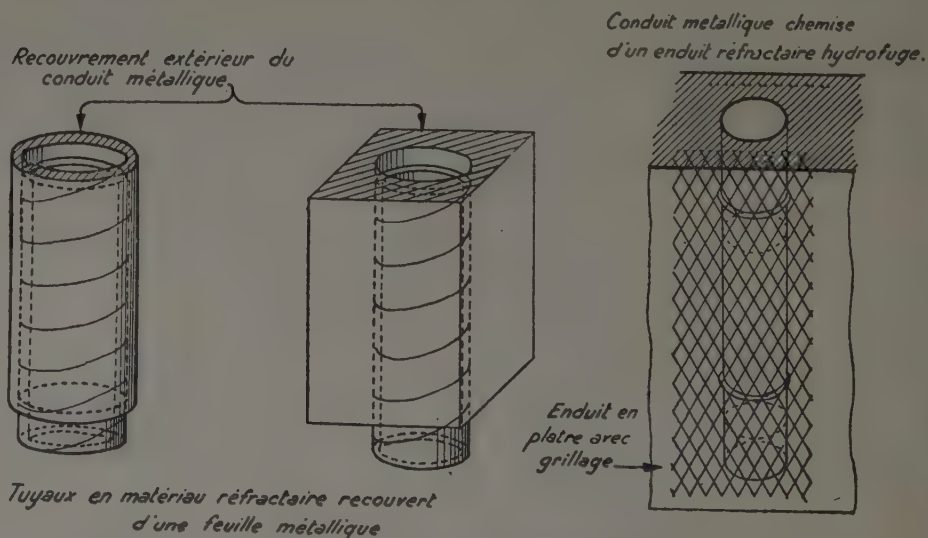


FIG. 15. — Quelques modèles de conduits devant répondre aux exigences.

A côté de ceux-ci d'autres pourront peut-être aussi donner des résultats analogues, mais ils sont encore à trouver.

Des recherches vont être opérées dans ce sens prochainement. J'espère qu'il en sortira de nouvelles solutions, mais pour le moment je ne puis que vous indiquer la voie dans laquelle il me semblait que nous devions nous engager.

Je m'excuse de la longueur de mon exposé et de tous les oublis que certainement je n'ai pas manqué de faire, je vous remercie de l'attention que vous m'avez apportée

et me tiens à votre disposition pour vous donner tous les renseignements complémentaires dont vous pourriez avoir besoin.

J'écouterai, d'autre part, avec attention toutes les observations qui pourront être faites sur ce que je viens d'exposer, et remercie par avance ceux qui sur les différentes questions que j'ai traitées pourront m'apporter des renseignements; je ne me crois nullement la science infuse et suis toujours très heureux d'être plus amplement documenté, car ainsi que vous le voyez la tâche que j'ai entreprise est loin d'être terminée.

# ÉTANCHÉITÉ DES TOITURES-TERRASSES

Le problème de l'étanchéité des toitures-terrasses est fonction des qualités du revêtement d'étanchéité employé et non moins de celles du support d'étanchéité.

Il était indispensable de codifier ces deux aspects d'un travail confié en général à deux entrepreneurs de spécialisation différente, dont la responsabilité propre doit pouvoir être départagée en cas de litige.

La question des revêtements étanches a été traitée dès 1944 dans une brochure intitulée « Travaux d'Étanchéité pour Toitures-Terrasses. Principaux procédés d'Étanchéité ». Ce document de 16 pages codifie les revêtements types pour l'étanchéité des toitures-terrasses. Il examine successivement :

- a) Les matériaux de base ;
- b) L'étanchéité par asphalte coulé et trois types de réalisation ;
- c) L'étanchéité multicouches par chape souple du système indépendant ou du système collé ;
- d) L'étanchéité multicouches par ciment volcanique par système indépendant (deux variantes) ou système collé ;
- e) L'étanchéité multicouches par enduit plastique ;
- f) L'étanchéité multicouches par feutre bitumé.

Les indications de composition, de dimension et de poids sont données pour chaque procédé.

En annexe se trouvent quelques indications sommaires relatives aux travaux concernant le support, l'isolation, l'évacuation des eaux, la protection, l'entre-

tien. Mais ces sujets très importants ont reçu un nouveau développement dans un document paru en 1946 sous le titre : « Conditions d'exécution du gros œuvre des toitures-terrasses en béton armé ». Établi par des représentants désignés par les Chambres Syndicales des diverses spécialités : ciment armé, maçonnerie, étanchéité, ainsi que par l'Office des Asphaltes, le Bureau Securitas, le Bureau Veritas et l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, ce code de 28 pages et 27 figures traite successivement de :

- a) La constitution des planchers, les qualités des matériaux à employer, les contraintes admissibles, les charges et les surcharges à considérer, la valeur des flèches admissibles, le mode de calcul, l'exécution des travaux ;
- b) L'importante question de la fragmentation du gros œuvre par des joints destinés à parer aux effets du retrait, de la dilatation, des tassements inégaux ainsi que les détails d'exécution et de protection de ces joints ;
- c) L'évacuation des eaux par pente dans le gros œuvre ou avec forme adhérente ou forme flottante, les dispositions des chéneaux descentes et trop-pleins ;
- d) La liaison avec les ouvrages saillants et contigus ;
- e) Quelques questions diverses telles que l'isolation thermique, la protection de l'étanchéité, les plafonds, les accès et l'exécution.

Ces documents sont en vente à l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics aux conditions suivantes :

## TRAVAUX D'ÉTANCHÉITÉ POUR TOITURES-TERRASSES - PRINCIPAUX PROCÉDÉS D'ÉTANCHÉITÉ

Broché : fr 50 », plus fr 8 » pour frais d'envoi.

## CONDITIONS D'EXÉCUTION DU GROS ŒUVRE DES TOITURES-TERRASSES EN BÉTON ARMÉ

Broché : fr 100 », plus fr 8 » pour frais d'envoi.

Les commandes sont à adresser à l'INSTITUT TECHNIQUE DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS, 28, boulevard Raspail, accompagnées d'un mandat, chèque barré ou versement au compte chèque postaux : PARIS 52-9401.

---

**LIANTS HYDRAULIQUES, N° 2**

**CENTRE D'ÉTUDES SUPÉRIEURES**

**EXPOSÉ DU 4 MAI 1948**

**LE CENTRE D'ÉTUDES ET DE RECHERCHES  
DE L'INDUSTRIE  
DES LIANTS HYDRAULIQUES**

**Par M. Henri LAFUMA,**

Professeur au Conservatoire National des Arts et Métiers, Directeur du Centre.

**SOUS LA PRÉSIDENTENCE DE M. Armand MAYER,**

Inspecteur général des Mines, Président du Conseil du Centre.

---

*Reproduction interdite.*

---

## INTRODUCTION DU PRÉSIDENT

S'il ne s'était agi que de présenter M. LAFUMA à un auditoire qui a eu si souvent l'occasion de l'écouter et de l'apprécier, je me serais certainement abstenu de prendre la parole ce soir. Mais il s'agit de vous présenter notre *Centre d'Études et de Recherches des Liants Hydrauliques* qui vient d'entrer dans sa deuxième année d'existence et il m'est particulièrement agréable de participer à cette manifestation.

L'idée d'un *Centre d'Études et de Recherches des Liants Hydrauliques* avait été lancée au cours de la guerre par le *Comité d'Organisation des Chaux et Ciments*. Il avait été prévu de le réaliser sous la forme d'un établissement professionnel. Malheureusement, bien que la décision du principe eût été prise à temps par M. l'Inspecteur Général des Ponts et Chaussées HUPNER, qui remplissait les fonctions de Commissaire du Gouvernement auprès du Comité, la réalisation n'avait pas suivi assez rapidement, si bien que l'on pouvait se demander si le projet ainsi ébauché ne resterait pas lettre morte. Il fut heureusement possible, lors de la dissolution du Comité d'Organisation, de garder toute sa validité à la décision du Commissaire du Gouvernement créant le Centre d'Études. Les Statuts furent à l'époque établis par le Cabinet du Ministre de la Production Industrielle et approuvés par les deux Ministres de l'Économie Nationale et de la Production Industrielle les 7 décembre 1946 et 4 janvier 1947. Le Centre des Liants était créé.

M. LAFUMA vous dira tout à l'heure ce qu'il a fait depuis un an et ce qu'il compte faire. Je voudrais simplement vous indiquer que ce Centre vient prendre sa place dans un ensemble qui doit, dans un délai de dix-huit mois à deux ans, comporter la réalisation d'un CENTRE NATIONAL DE RECHERCHES DES MATÉRIAUX. Cet ensemble comprendra : d'une part le Centre des Liants, d'autre part les divers organismes qui poursuivent les recherches techniques en matière céramique (SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE CÉRAMIQUE, SOCIÉTÉS PROFESSIONNELLES, etc.). Le terrain sur lequel s'élèvera le LABORATOIRE CENTRAL DES MATÉRIAUX a déjà été acheté au voisinage des LABORATOIRES DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS qu'il complètera sans le doubler. C'est en effet aux recherches intéressant la production des matériaux que s'attellera le nouvel organisme plutôt qu'à celles relatives à leur utilisation et à leur mise en œuvre qui restent du ressort des laboratoires de la rue Brancion.

Comme vous le voyez, la recherche dans le domaine des matériaux est en pleine organisation. En même temps que nous vous présentons le Centre des Liants qui a maintenant un an d'existence, nous voudrions vous annoncer que lorsque une autre année sera passée il sera bien près de disposer de ses locaux et d'un laboratoire dont nous espérons faire le premier d'Europe.

## EXPOSÉ DE M. LAFUMA

Lorsque M. LEBELLE m'a demandé, en novembre dernier, d'inscrire, au programme des conférences de la session 1948, un exposé sur le *Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie des Liants Hydrauliques*, que je présenterais ainsi aux membres de l'Institut Technique, j'ai éprouvé une certaine perplexité; non pas qu'il me soit désagréable de parler du Centre d'Études, bien au contraire, mais j'hésitais sur le thème à choisir: valait-il mieux parler de ce qu'avait réalisé le Centre ou de ce qu'il se proposait de faire? Le tour des réalisations d'un organisme, qui totalisait alors six mois d'existence, dont les mois d'été, était vite fait; il était certes plus facile de parler de ce qu'on voulait faire, plus facile mais délicat, car l'auditeur pense souvent qu'au lieu de développer complaisamment ses intentions, il est préférable d'agir.

Mon premier soin a été de demander que cet exposé fût tardif dans la session des conférences et coïncidât avec le premier anniversaire du Centre: peut-être entre temps, le Centre d'Études aurait-il quelque réalisation à son actif.

Me voici prêt à vous dire aujourd'hui ce qu'est le *Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie des Liants Hydrauliques*, le peu que nous avons réalisé à ce jour et que nous espérons faire à l'avenir, à la lumière de l'expérience acquise. Pareil examen de conscience n'est pas sans utilité à la veille du jour où les Centres Techniques Industriels vont recevoir leur statut juridique et où il sera nécessaire de les adapter au nouvel état de choses.

En prescrivant la dissolution de l'*Office Professionnel des Chaux et Ciments*, l'arrêté ministériel du 15 juillet 1946 a prévu le maintien de la Décision n° 52 du Commissaire Provisoire, créant un ÉTABLISSEMENT PROFESSIONNEL, en exécution de l'acte dit loi, du 17 novembre 1943, Établissement dénommé *Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie des Liants Hydrauliques*.

Le Conseil d'Administration du Centre d'Études s'est réuni pour la première fois le 29 avril 1947; il y a donc juste un an que le Centre est entré en fonction.

Avant d'examiner l'activité de ce nouvel organisme, nous indiquerons rapidement son objet, son organisation et ses moyens d'action.

Ses Statuts lui assignent comme objet :

La centralisation de toute la documentation française et étrangère relative à l'industrie des liants hydrauliques.

L'orientation ou la conduite des études et recherches de techniques nouvelles dans l'industrie des liants hydrauliques.

Le contrôle général des produits fabriqués, ainsi que des matières premières ou produits divers employés par les fabricants de liants hydrauliques.

La poursuite d'études et d'essais de prototypes de matériels à utiliser à la fabrication des liants hydrauliques.

La gestion du fonds d'études et de recherches prévu par les arrêtés de prix en vigueur.

Le Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie des Liants Hydrauliques est un Établissement Professionnel, administré par un Directeur, assisté d'un Conseil d'Administration, comprenant onze membres, choisis pour leur compétence technique, à savoir :

a) Un représentant du Ministère de la Production Industrielle;

Un représentant du Ministère des Travaux Publics,

Un représentant du Ministère de la Reconstruction et de l'Urbanisme.

b) Trois représentants des Industriels de la Profession des Chaux et Ciments,

Un représentant des Industriels du Bâtiment et des Travaux Publics.

c) Trois représentants du personnel de la Profession des Chaux et Ciments,

Un représentant du personnel de la Profession du Bâtiment et des Travaux Publics.

Tous ces représentants sont proposés par les organisations syndicales les plus représentatives et nommés par le Ministre de la Production Industrielle.

« Le Directeur du Centre d'Études et de Recherches constitue — article 18 des Statuts — autant de *Commissions Techniques* spécialisées qu'il juge utile et qui l'assistent de leurs conseils techniques, en suivant particulièrement l'élaboration et l'exécution des programmes de recherches de la spécialité.

« Ces commissions comprennent les représentants de la profession ainsi que les représentants des industries ou services publics clients de la profession et les techniciens qualifiés qu'il paraît utile d'y appeler. Leur constitution permet d'établir un contact intime et efficace entre la profession, les industries ou administrations clientes et les Centres techniques industriels. »

Dès à présent, ont été constitués et réunis :

Le Comité Technique Consultatif du Centre d'Études,

Les Commissions spécialisées de :

Normalisation, réception, contrôle,  
Laitiers, pouzzolanes et fillers,  
Méthodes d'analyse chimique,  
Utilisation des ciments.

D'autres Commissions spécialisées sont prévues et seront réunies en fonction des possibilités d'étudier des problèmes nouveaux de leur compétence :

Documentation,  
Études scientifiques,  
Fabrication et économies de matière,  
Matériel et équipement des usines.

Les Commissions ont assez mauvaise réputation ; je m'en voudrais de laisser croire aux techniciens, qui apportent leur concours au Centre d'Études, que leurs réunions répondent au seul désir de manifester une apparence d'activité, ou même de les tenir simplement au courant d'une activité réelle. En réalité, les réunions de Commissions peuvent être très utiles... à certaines conditions... que le Centre d'Études s'efforce naturellement de toujours respecter et qui sont d'ailleurs celles qu'ont indiquées ses promoteurs dans l'Article 18 des Statuts. Les Commissions dont les membres sont judicieusement choisis sont de merveilleux instruments d'information ; mais il ne faut pas leur demander de décision. C'est un principe reconnu quand on fait de la bonne politique : délibérer appartient à plusieurs, agir est le fait d'un seul.

Comme l'écrivent les artisans de la reconstruction du môle de Zeebrugge :

« La solution la meilleure et la plus simple naît d'une série d'échange de vues, de consultations et de réflexions. Les premières idées, de peine ébauchées au début, un peu fantasques parfois, souvent décevantes, se concrétisent, s'épurent petit à petit et deviennent la conception directrice de l'exécution. Cette préparation méticuleuse du travail, parfois longue, peu spectaculaire, permet généralement une réalisation rapide, énergique et sans aléa. »

C'est ce travail de préparation que peuvent beaucoup faciliter les Commissions ; mais pour qu'elles aient une efficacité certaine il est nécessaire de ne pas s'écarter du programme fixé à l'avance en vue de la solution d'un problème précis. C'est dire que les Commissions du Centre d'Études ne sont pas réunies, périodiquement, à dates fixes, mais pour l'examen de problèmes limités, l'établissement de programmes d'études, la discussion des rapports présentés à la suite de celles-ci et des conclusions à en tirer, la rédaction de suggestions à présenter soit aux pouvoirs publics, soit aux administrations, soit aux fabricants intéressés.

Pour que cette organisation donne tout ce qu'on en attend, il faut d'abord réaliser une atmosphère de sincérité et de confiance réciproque. Il faudrait ne rien connaître, de la psychologie et du particularisme des techniciens, et surtout des chercheurs français, pour s'imaginer que la coordination des recherches est facile à organiser.

En préambule d'une causerie devant la Société des Ingénieurs Civils, M. FOURNEAU, Président-Directeur Général de la Société de Traitements Électrolytiques et Électrothermiques, déclarait récemment :

« Combien de fois avons-nous, en effet, constaté que le même problème était étudié à grands frais par deux ou trois équipes de chercheurs, soigneusement isolés les uns des autres, simplement parce que le problème était techniquement « à la mode ».

« Combien de fois avons-nous constaté que toute

tentative de coordination était vaine ? Cet état d'esprit est très préjudiciable à l'intérêt français et le seul moyen d'aboutir à des résultats pratiques est de faire cesser cette tendance à la compétition et de faire réaliser des accords ou des ententes entre groupes industriels et laboratoires d'État, de coordonner leurs travaux, d'échanger des idées et informations, de rassembler tous les moyens disponibles pour aboutir à un résultat, en laissant toutefois à chaque constructeur, et à chaque industrie, la possibilité de tirer parti des résultats obtenus à frais communs.

« C'est à cela que doivent travailler les éminents savants qui possèdent une autorité indiscutée, capable d'entraîner dans la même voie les chefs de l'industrie française qui pèchent souvent par manque d'information. »

On ne saurait mieux définir l'objet même d'un Centre d'Études et je voudrais maintenant vous dire à quelles conditions, à mon avis, on peut en espérer la réussite, car, fort heureusement, il n'est nullement nécessaire pour cela — ni suffisant d'ailleurs — de placer à sa tête « un éminent savant ».

Pour que, sur le plan de la coordination des recherches, le succès d'un Centre d'Études soit possible, il faut que ses dirigeants se persuadent tout d'abord qu'ils ne doivent en rien se prévaloir des résultats obtenus ; il leur appartient de distribuer les tâches, de susciter les recherches, d'apprécier les résultats, en renonçant eux-mêmes à certaines satisfactions ; il leur appartient en quelque sorte de semer la graine qui deviendra la moisson. Il est indispensable que les chercheurs, dont il faut respecter l'indépendance morale et matérielle, conservent le bénéfice de leurs études et, en tout premier lieu, que les recherches publiées sous l'égide du Centre, portent la signature de leurs auteurs.

Quand il a créé la *Revue de Métallurgie*, Henry LE CHATELIER s'est plaint amèrement de ce que plusieurs grandes Sociétés avaient interdit à leurs ingénieurs, non seulement d'apporter des mémoires originaux, mais encore de faire des traductions ou extraits de mémoires parus en langue étrangère ; attitude motivée, écrivait-il, par la crainte de rendre service à des concurrents.

L'état d'esprit des industriels a beaucoup évolué depuis cette époque et si certains ne sont pas favorables à une publication rapide des résultats des études d'intérêt général entreprises dans leurs laboratoires, rares sont ceux qui persistent longtemps dans cette attitude. La crainte de rendre service à des concurrents se manifeste encore quelquefois et j'en ai eu des échos ; aussi, je crois opportun d'indiquer aux Chefs d'entreprise la raison profonde pour laquelle je n'éprouve aucun scrupule à négliger cette crainte.

Les industriels sont beaucoup plus étroitement solidaires qu'ils ne le pensent et ce qui favorise l'un n'est pas nécessairement au détriment d'un autre. S'imaginer que l'activité industrielle est conditionnée avant tout par le partage d'un marché, à peu près fixé, est une vue simpliste : toutes les entreprises sont en réalité soumises à la même conjoncture économique — et aux mêmes réglementations — qui leur apportent à toutes simultanément, je schématise un peu, facilité ou difficultés dans les affaires. La question qui se pose est de savoir si l'aide apportée à un concurrent, par une Société techniquement plus avancée, a une influence sur la conjoncture écono-

mique ; à tort ou à raison, je pense que toute collaboration loyale, dans le cadre de la profession, tant sur le plan technique que sur d'autres plans d'ailleurs, a une influence heureuse sur le standing moyen de la profession et, par là-même, une incidence favorable sur la conjoncture économique nationale. Assurément, cette incidence est faible et le chef d'entreprise peut penser qu'un petit perfectionnement technique est peu de chose en regard des larges profits que peut réaliser une spéculation heureuse sur de simples différences de cours. C'est cependant l'accumulation de ces petits perfectionnements techniques qui assure, en définitive, les progrès de l'industrie ; car il est aussi quelquefois des spéculations malheureuses.

J'estime donc qu'il est indispensable que le chercheur, travaillant sous l'égide du Centre d'Études, ait toute latitude de publier le résultat de ses recherches. Mais ce n'est pas suffisant ; il peut aussi demander au Centre, non pas d'imposer une doctrine, mais de créer une ambiance, de favoriser un état d'âme qu'on acquiert seulement au contact d'hommes ayant longtemps vécu dans l'atmosphère de la recherche et de la recherche spécialisée, car chaque branche a sa technique, son manuel opératoire, sa manière de raisonner et d'envisager les problèmes. Les dirigeants d'un Centre d'Études, comme le « patron » d'un laboratoire de recherches, doivent s'attacher à créer une tradition, dont peut profiter le plus grand nombre possible de travailleurs. C'est pour éviter que cette tradition ne devienne à la longue une routine qu'il est nécessaire d'obtenir la collaboration de nombreux chercheurs de formations variées et d'origines diverses. Une direction scientifique peut éviter aux débutants les tâtonnements et les faux aiguillages ; elle fait profiter les nouveaux venus de l'expérience des aînés. Un Centre d'Études doit être une personne morale intelligente qui subsiste malgré le remplacement de ses membres. Et cette perpétuité est d'autant plus désirable, en l'occurrence, que l'évolution de l'industrie des ciments est plus lente, car plusieurs années sont parfois nécessaires pour qu'on puisse parfaitement reconnaître les qualités et les défauts d'un produit nouveau.

« Nommé professeur à la Sorbonne, écrit Henry LE CHATELIER, je me trouvais surchargé d'occupations et dans l'impossibilité de continuer à travailler au laboratoire. J'aurais pu, me conformant à un usage tout à fait général et parfaitement légitime, mettre mon nom sur les travaux de mes élèves, effectués sous ma direction. Je ne voulais pas le faire, parce que je n'avais jamais été assujéti dans ma jeunesse à partager le fruit de mon labeur avec un chef et je tenais à donner le même avantage à mes élèves. Je cessais donc en apparence tout travail de laboratoire. »

J'ai été l'élève de LE CHATELIER et puis témoigner de ce qu'un débutant peut devoir à son maître. A défaut des mêmes lumières que je ne peux leur apporter, les jeunes Collaborateurs du Centre d'Études y trouveront le même état d'esprit, beaucoup plus nécessaire ici d'ailleurs que dans un laboratoire universitaire.

Les moyens de l'Établissement sont fonction de ses ressources qui comprennent notamment :

Le montant des sommes dues par les fabricants de liants hydrauliques, en application des arrêtés de prix en vigueur,

Les intérêts et revenus des biens et valeurs lui appartenant,

Le montant des rémunérations pour services rendus aux membres de la profession et aux tiers,

Le montant des subventions allouées, le cas échéant, par l'État, les collectivités publiques ou par toutes autres personnes.

Enfin, si le Centre doit, dans l'avenir, collaborer au perfectionnement professionnel et technique de l'industrie des ciments, dans un but de promotion sociale, on peut penser qu'il sera habilité à percevoir une part des taxes en vigueur de formation professionnelle et d'apprentissage.

Cette incidence m'amène à dire un mot de l'intérêt social du Centre d'Études. L'industrie française des ciments groupe environ trente-cinq sociétés, réparties — si l'on se place au seul point de vue de la production de ciment — en trois grosses entreprises, une douzaine de moyennes et une vingtaine de petites. On peut estimer — je m'en excuse auprès des « Trois Grands » — que la survie des petites et moyennes entreprises est d'un intérêt primordial, pour le pays ; or, celles-ci ne pourront subsister qu'en disposant de services de documentation, de contrôle et de recherches dont elles ne peuvent pas toujours faire individuellement les frais ; un Centre d'Études doit suppléer à cette carence et ce n'est pas son moindre mérite d'associer ainsi toutes les entreprises de la profession, pour le plus grand bien de l'économie nationale. Contrairement à ce qu'on pourrait croire d'ailleurs, ce ne sont pas toujours les entreprises, qui entretiennent déjà un laboratoire de recherches, qui s'intéressent le moins à l'organisme au service de la communauté professionnelle. C'est une remarque que j'ai déjà pu faire plusieurs fois.

Les moyens d'action du Centre d'Études comprennent tout d'abord les services centraux :

Direction administrative et technique.

Service de documentation.

Service de contrôle.

Enfin, en attendant la réalisation d'un laboratoire et d'ateliers-pilotes qui lui soient propres, le Centre fait exécuter des travaux de recherches dans les laboratoires existants :

Laboratoires, officiels ou privés, pouvant apporter leur collaboration sur le plan de la fabrication, du contrôle ou de l'utilisation des liants hydrauliques.

Et surtout, laboratoires de recherches, des fabricants, mieux à même que personne de connaître les problèmes qui intéressent leur industrie.

Le Service de Documentation, dirigé par un ingénieur, est chargé de rassembler, classer et diffuser la documentation française et étrangère intéressant l'industrie des liants hydrauliques.

Ce Service, en voie de constitution, disposera :

D'un fichier bibliographique aussi complet que possible, et pour lequel il nous est particulièrement agréable de remercier ici la Société des Chaux et Ciments de Lafarge et du Teil de l'aide précieuse qu'elle nous apporte.

D'une bibliothèque de livres et de brochures.

Les collections de périodiques seront très réduites, mais remplacées par des microfilms ou des photostats de tous les articles intéressants.

Le Centre assurera le dépouillement des revues de la spécialité, dans le cadre du Centre National de la Recherche Scientifique, et collaborera au *Bulletin Analytique* du Service de Documentation de ce Centre National. Pour éviter les doubles emplois, nous avons pris contact avec les organismes, français ou étrangers, intéressés au même travail, total ou partiel, de dépouillement.

Le Conseil d'Administration du Centre a estimé qu'il n'y avait pas lieu de créer un nouveau périodique, mais qu'il était préférable d'utiliser, au mieux de l'intérêt général, les organes existants. La diffusion des résultats des recherches, poursuivies sous l'égide du Centre d'Études, est assurée par l'envoi de tirés à part — sous la couverture du Centre — de publications faites, soit dans la *Revue des Matériaux de Construction*, soit, le cas échéant, dans d'autres revues. Périodiquement, paraîtront, dans la *Revue des Matériaux*, de larges extraits ou des traductions intégrales des articles étrangers les plus importants.

Parallèlement, le Service de Documentation s'efforcera de répondre à toute question particulière posée par les producteurs et utilisateurs de ciment.

C'est aussi dans le cadre de la diffusion de la documentation que peut se placer l'activité manifestée par le Centre d'Études dans les conférences publiques et les congrès. Le Directeur du Centre a fait ainsi, le 8 décembre à Alger, à la demande des services du Gouvernement Général, une conférence sur « L'emploi des Ciments actuels dans la construction ». Cette conférence a été répétée, le 24 avril à Casablanca, devant l'Institut du Bâtiment et des Travaux Publics du Maroc, dont c'était d'ailleurs la première manifestation publique. Sous les auspices du Commissariat Général aux Économies de Matières, a été donnée, le 29 janvier, au Centre de Perfectionnement Technique de la Maison de la Chimie, une conférence sur l'« Utilisation des laitiers comme source principale d'économie de combustibles en cimenterie ». C'est à la demande du Président et du Directeur du Centre d'Études, qu'a été donnée, ici-même, il y a quelques semaines, la conférence sur « la Stabilité des ciments », de M. LÉON BLONDIAU, Directeur de la Société des Ciments de Thieu, et dont beaucoup d'entre vous ont pu apprécier tout l'intérêt.

Enfin, le Centre d'Études, par l'un ou l'autre de ses membres, doit participer activement à diverses manifestations collectives, françaises ou internationales :

*Centenaire de la Société des Ingénieurs Civils de France*, à la fin du mois.

*Rapport sur les ciments spéciaux pour barrages en France, et sur la détermination de la granulométrie des ciments*, au III<sup>e</sup> Congrès des Grands Barrages, à Stockholm, en juin ; au XXI<sup>e</sup> Congrès de Chimie Industrielle, à Bruxelles, en septembre, et à une date plus lointaine :

*Rapport sur les constatations récentes et précautions nouvelles à l'égard de la décomposition des mortiers et bétons dans l'eau de mer*, au XVII<sup>e</sup> Congrès International de Navigation, à Lisbonne, en septembre 1949.

Cette activité spectaculaire n'est nullement désagréable, mais, pour ma part, je préférerais qu'elle ne devint pas trop absorbante.

En ce qui concerne le contrôle des produits fabriqués, des études déjà anciennes avaient montré que l'organisation qui répondait le mieux à l'intérêt général était un

élargissement de la marque V P, de la Ville de Paris, qui contrôlait déjà pratiquement les trois quarts des produits, en une marque nationale de conformité aux Normes, dans le cadre de la marque NF (Normes Françaises), approuvée par l'Association Française de Normalisation.

Le Comité particulier de la marque NF, pour les Chaux et Ciments, dans sa réunion du 14 avril dernier, a créé la marque NF-VP, que recevront les produits de qualité. Le contrôle, sous l'égide de l'A. F. N. O. R. et du Centre d'Études, sera assuré par les Services Techniques de la Préfecture de la Seine, dont la longue expérience en la matière est connue et appréciée de tous.

Ainsi se trouve réalisé le contrôle des produits fabriqués, que prévoyaient les Statuts du Centre d'Études ; on peut espérer que les administrations et autres usagers, associés à la gestion de la marque nationale NF-VP, éviteront, à l'avenir, des superpositions de contrôle et, indépendamment des essais de réception, auxquels tout maître d'œuvre entend procéder, limiteront leur propre examen des produits aux caractéristiques nécessitées par des emplois particuliers. Nous pensons que c'est dans ces conditions que la nouvelle marque NF-VP servira le mieux l'intérêt général.

Qu'on nous permette d'exprimer ici la satisfaction que nous éprouvons de cette première réalisation à laquelle le Centre d'Études ait participé ; il est très honorable pour le nouvel organisme que la Préfecture de la Seine et l'Association Française de Normalisation lui aient reconnu une autorité morale suffisante pour l'associer à leur Convention.

La marque nationale NF-VP est l'aboutissement des premiers pourparlers, engagés dès 1942, entre l'A. F. N. O. R., la Ville de Paris et le Comité d'Organisation des Chaux et Ciments, pourparlers qui n'avaient pu aboutir à l'époque, que le Centre d'Études a repris et dont il a pu faciliter le succès.

M. LHOSTE, Directeur Général de l'A. F. N. O. R., qui avait suivi avec intérêt et favorisé tous ces pourparlers est malheureusement décédé à la veille d'en voir la réussite. Par une coïncidence pénible, la circulaire accompagnant l'envoi, aux Membres du Comité particulier de la Marque, du projet de règlement, circulaire signée des Directeurs de l'A. F. N. O. R. et du Centre d'Études, est probablement la dernière manifestation de l'activité de M. LHOSTE, dont vous voudrez bien saluer ici la mémoire, avec moi.

Le contrôle des ciments pose les problèmes de la mise au point et de la normalisation des méthodes d'essais tant mécaniques que physiques ou chimiques.

Les méthodes d'essais mécaniques donnent lieu à des études poussées dont le besoin est incontestable, les ciments étant vendus maintenant en fonction de la résistance. Malgré tous les efforts accomplis depuis un demi-siècle, on constate une dispersion excessive entre les résultats obtenus par des laboratoires différents et parfois même entre ceux qu'obtiennent, dans le même laboratoire, des opérateurs consciencieux. C'est, semble-t-il, en mécanisant les essais que l'on réduira le plus sûrement cette dispersion. Le Centre d'Études subventionne et coordonne les recherches déjà avancées sur cette question de la mécanisation de l'essai normal et s'efforcera de faire

aboutir une solution satisfaisante. La mécanisation pourra se faire en deux stades : gâchage, puis remplissage des moules. De plus, il serait souhaitable que les résultats de l'essai normalisé de réception en mortier soient facilement transposables en béton. Les laboratoires de Physique Industrielle d'Alger, de Recherche Scientifique et de Perfectionnement Technique de Grenoble, du Bâtiment et des Travaux Publics, nous apportent sur ce point une aide précieuse et des solutions originales.

Il convient naturellement de s'assurer que toute modification introduite dans les méthodes d'essais correspond à un progrès ; il apparaît donc nécessaire de reprendre l'étude statistique de la méthode actuelle pour pouvoir comparer, dans l'avenir, les nouvelles techniques. Une dizaine de laboratoires, officiels ou industriels, participeront à cette étude qui portera sur plusieurs lots de ciments soigneusement homogénéisés, et le plus grand nombre possible de détails opératoires seront précisés ; pour l'interprétation des résultats, nous espérons pouvoir tirer parti des méthodes modernes de l'analyse statistique.

Le Centre sera conduit à étudier la mise au point et à préparer la normalisation des essais destinés à mesurer certaines *propriétés physiques* dont la connaissance est souvent utile : finesse, chaleur d'hydratation, retrait, etc.

Le Centre se préoccupe également des problèmes d'analyse chimique : un chimiste-analyste étudiera et s'efforcera d'améliorer les méthodes actuellement utilisées, en profitant des progrès réalisés dans les autres branches de la chimie analytique. Il préparera les normes d'analyses à soumettre à l'A. F. N. O. R., favorisera, en attendant leur homologation, l'uniformisation des méthodes actuellement employées dans les différents laboratoires officiels, et étudiera la mise au point des méthodes nouvelles. Parallèlement à cette activité sur le plan de la recherche, il aura pour mission, non seulement de conseiller et de guider les techniciens qui, dans les usines, souvent isolées, et les laboratoires industriels, feront appel à lui, mais encore, au cours de stages de perfectionnement, il s'attachera à compléter leurs connaissances ; sur ce plan pédagogique, il pourra rendre aussi, nous l'espérons, de grands services à la profession. Il y a là une lourde charge ; il convenait donc de confier cette mission à une personne déchargée par ailleurs des soucis quotidiens des chimistes des laboratoires officiels ou industriels et qui ait une tranquillité d'esprit suffisante pour se consacrer exclusivement à cette tâche. Le Laboratoire de Chimie Appliquée aux Matériaux de Construction du Conservatoire National des Arts et Métiers, peut accorder un asile au collaborateur du Centre.

Sans attendre la réalisation du *Laboratoire*, pour laquelle les estimations les plus optimistes — ce ne sont pas les nôtres — prévoient que deux années seront nécessaires — et qui d'ailleurs n'interrompra pas les relations déjà nouées, il fallait commencer le travail de recherches qui constituera l'objet principal du Centre d'Études.

Nous avons fait appel aux laboratoires officiels ou privés susceptibles de nous apporter leur collaboration sur le plan de la fabrication, du contrôle ou de l'utilisation des ciments, et, dans toute la mesure du possible aux laboratoires des fabricants. Le nombre même de ceux qui ont répondu favorablement à notre demande nous a placé devant la difficulté, déjà signalée, de limiter le nombre

des chercheurs attachés au même problème « à la mode », car les problèmes intéressants ne sont pas très nombreux.

L'inconvénient de laisser deux ou plusieurs laboratoires étudier la même question nous paraît d'ailleurs avoir été fortement exagéré : un avantage non négligeable est qu'on aura au moins une vérification, qui peut s'avérer utile ; dans les problèmes complexes, que pose la pratique industrielle, il peut être opportun d'aborder la même question sous des angles différents et ce qui échappe à l'un peut retenir l'attention d'un autre ; l'un, plus théoricien, s'intéresse à la répercussion des résultats dans le cadre d'une doctrine plus générale, l'autre est plus préoccupé de la solution des difficultés pratiques. Il appartient au Centre d'Études de coordonner les indications qui lui sont fournies pour préparer des solutions satisfaisantes ou permettre de prendre des décisions à bon escient. Cette intervention atténue l'effet de la dispersion des efforts et rétablit l'unité d'action désirable.

Le premier *programme de recherches*, approuvé par le Conseil d'Administration du Centre d'Études, et dont l'exécution a commencé il y a environ six mois, concerne essentiellement les problèmes déjà mentionnés et d'autres, dont nous dirons quelques mots maintenant.

Au moment où l'on envisage de développer considérablement l'emploi des *laitiers de haut fourneau* en cimenterie, il apparaît indispensable de faire un gros effort pour développer nos connaissances, encore insuffisantes, sur ces produits, plus irréguliers que les clinkers. Sur le plan de la recherche, la France devrait figurer très honorablement dans ce domaine où les Américains ne semblent pas vouloir mettre en œuvre leurs immenses moyens. Le Centre d'Études fait réunir, sur un nombre suffisant de laitiers, le maximum de données mécaniques, physico-chimiques et chimiques. C'est de l'interprétation de ces données que nous espérons tirer des conclusions intéressantes sur l'hydraulicité des laitiers. Dans cette étude encore, nous espérons pouvoir mettre à profit les méthodes modernes de l'analyse statistique qui nous délivrent, prétend-on, de l'obligation cartésienne de ne faire varier qu'un seul facteur à la fois et qui ne nécessitent plus de réunir un très grand nombre de résultats.

C'est qu'en effet, dans ce domaine, il est pratiquement impossible de ne faire varier qu'un seul facteur à la fois ; les laitiers ne sont pas fabriqués spécialement ; ce sont des sous-produits de la fabrication de la fonte. On les utilise tels qu'on les reçoit en cimenterie ; leur qualité dépend de facteurs complexes dont on n'est pas toujours maître et qu'il est même quelquefois difficile de préciser :

Température de coulée,  
Conditions de granulation,  
Composition chimique,  
Structure physique,  
Finesse, etc...

Beaucoup d'études ont porté sur un trop petit nombre de laitiers pour qu'on puisse en tirer des conclusions générales ; quand on examine les résultats accumulés, on a l'impression qu'il existe plusieurs familles de laitiers qu'il faudrait savoir séparer pour pouvoir interpréter les résultats expérimentaux ; mais on ne voit pas sur quel critérium baser ce classement. Une doctrine cohérente

des laitiers de cimenterie faciliterait assurément leur amélioration et par là même leur utilisation en quantité plus massive, si désirable économiquement.

Le problème de la  *finesse des ciments*  a trois aspects différents :

La  *mesure de la finesse*  des ciments actuels demande un appareillage plus perfectionné que l'ancien tamis. Une étude de MM. LHOPITALIER et MOMOT, qui sera présentée au Congrès de Stockholm, fait en quelque sorte le point des différentes méthodes préconisées : turbidimétrie, perméabilité à l'air, fluorimétrie. Il y a deux façons de présenter en définitive le résultat : donner une courbe granulométrique de la poudre considérée ou donner sa « surface spécifique », c'est-à-dire la surface qu'occuperait 1 g de matière dont tous les grains seraient développés. La surface spécifique, telle que la donne le turbidimètre de WAGNER ou le perméabilimètre de BLAINE, est une grandeur conventionnelle ; rappelons que, suivant la méthode employée (turbidimètre de WAGNER ou adsorption de gaz), on peut trouver, pour la surface spécifique d'un même ciment, des chiffres allant de 1 900 cm<sup>2</sup>/g à 10 800 cm<sup>2</sup>/g. Le fluorimètre est basé sur le fait que, dans un fluide donné, l'air par exemple, la vitesse de chute de particules, supposées sphériques, dépend uniquement du diamètre des particules. On met en émulsion le ciment dans un courant d'air ascendant de vitesse constante. Les particules, dont la vitesse de chute est inférieure à la vitesse du courant d'air ascendant, sont entraînées avec lui. Les autres tombent et on les recueille à la base de l'appareil. Par pesée on détermine leur proportion dans le ciment.

On a de la sorte séparé les unes des autres les particules dont les vitesses de chute sont supérieures et inférieures à une certaine vitesse, c'est-à-dire dont les diamètres sont supérieurs et inférieurs à une certaine valeur. Un étalonnage de l'appareil permet de connaître la dimension de séparation, qu'on peut du reste modifier à volonté en faisant varier la vitesse de l'air : le fluorimètre apparaît ainsi comme un tamis à ouverture variable et réglable. C'est la fluorimétrie qui concorde le mieux avec le contrôle au microscope ; elle paraît donner toute satisfaction. Les Suisses ont adopté cette méthode, sur les données techniques que le Centre s'efforcera précisément de répandre et de faire normaliser en France. Nous avons ici un exemple des conditions dans lesquelles peuvent se manifester l'utilité et l'efficacité d'un organisme comme le nôtre : il ne s'agit ni de découvrir ni de mettre au point une méthode nouvelle, mais de développer l'emploi d'une méthode reconnue satisfaisante.

L'influence de la  *finesse sur la qualité*  du ciment est un second aspect du même problème ; nous nous efforcerons de réunir des données relatives à la granulométrie optimum des ciments.

Enfin le troisième aspect du problème de la finesse est celui de sa  *réalisation industrielle* . Des indications que nous avons reçues, il ressort que le broyage en circuit fermé, par un ensemble broyeur-sélecteur, bien étudié, permettrait de modifier à volonté la granulométrie d'un ciment. Nous espérons donc pouvoir aborder prochainement le problème de la finesse dans toute sa généralité.

Le problème de l'utilisation des clinkers pour le  *garnissage réfractaire des fours rotatifs*  fait l'objet de recherches

au  *Laboratoire Central de l'Union française des Produits Réfractaires*  ; ce travail, d'un intérêt immédiat pour les cimentiers, est, dans notre esprit, le prélude d'une étude plus générale du problème des réfractaires en cimenterie.

Une connaissance plus précise des phénomènes de désagrégation des briques de clinker, utilisées dans la zone de cuisson, la transposition des techniques de l'industrie des réfractaires à la fabrication des briques de clinker, permettraient certainement d'améliorer celles-ci, en attendant que le problème du garnissage de la zone de cuisson des fours rotatifs puisse être résolu dans une autre voie.

Les perspectives de la fabrication du ciment en France sont satisfaisantes pour les mois à venir ; mais la pénurie de sacs papier crée actuellement une situation embarrassante. Nous savons, d'ores et déjà, que les quantités de sacs disponibles n'atteindront pas 60 % des quantités nécessaires pour ensacher la totalité des ciments fabriqués. Quoi qu'en pensent certains entrepreneurs, qui estiment que seule la livraison en sacs répond à leurs besoins, les producteurs de ciment ne sont pas à même de résoudre seuls le problème de la sacherie.

La réutilisation des vieux sacs pose des problèmes de marquage très délicats ; il convient néanmoins d'étudier la possibilité de généraliser cette solution et de faire un gros effort d'organisation pour augmenter la récupération des vieux sacs destinés à être réintroduits dans la fabrication du papier KRAFT ; il est inadmissible que des entreprises brûlent les vieux sacs qui encombrant leurs chantiers.

Mais, de toute façon, un tonnage très important de ciment ne pourra être livré qu'en vrac. Les  *expéditions en vrac* , par wagons complets, en dehors même du problème des wagons, créent des difficultés de déchargement qui ne peuvent être résolues que par l'emploi de matériels spéciaux assez peu répandus. Le transport par containers métalliques ou par cadres en bois résoudrait ces difficultés. Tout en favorisant l'expérimentation pratique d'autres solutions et en particulier l'emploi des fûts métalliques qui peut être envisagé, le Centre d'Études a entrepris, en liaison avec la S. N. C. F., l'étude des cadres en bois de 1 t de capacité, dont la fabrication en grande série pourrait facilement s'envisager.

Des prototypes de 1 t, fabriqués sur l'initiative du Centre, vont être mis en usage sur des wagons-plateformes ; ils effectueront des essais à l'échelle industrielle qui permettront de se rendre compte des services qu'un matériel de ce genre peut rendre pour favoriser la solution de la crise actuelle des emballages du ciment. Mais nous ne pensons pas que de telles solutions soient seulement des solutions de crise ; l'exemple des États-Unis, où 40 % environ du ciment est transporté en vrac, et où l'on ne saurait incriminer la pénurie de sacs papier, montre bien l'intérêt de ces essais pour l'avenir.

Les  *problèmes d'utilisation des ciments*  occupent dans le premier programme de recherches une place relativement importante, pour des raisons particulières, au premier rang desquelles il faut indiquer la possibilité d'y inclure des études déjà avancées, au moment de l'entrée en fonction du Centre, et dont nous avons eu à connaître par ailleurs, et la possibilité de demander immédiatement un

gros effort de recherches aux *Laboratoires du Bâtiment et des Travaux Publics* ; cela nous permettait en quelque sorte de roder les rouages administratifs du nouvel organisme.

Parmi les points qui ont retenu l'attention du Conseil, nous citerons :

L'influence des principaux facteurs des phénomènes de retrait et d'expansion ;

Les déformations plastiques et élastiques des bétons ;

Les relations qui existent entre l'élasticité et les résistances mécaniques et susceptibles de conduire à des mesures non destructives des éprouvettes ;

Le durcissement accéléré des bétons par la chaleur : étude physico-chimique et problèmes pratiques ;

La mise en place des bétons par vibration ;

Les méthodes de détermination rapide de l'altérabilité des bétons : gélivité et décomposition chimique.

C'est, en définitive, l'utilisation seule des ciments qui permet d'en reconnaître les qualités ou les défauts et, à ce titre, le Centre d'Études, plus orienté normalement vers les problèmes de fabrication, doit s'intéresser à l'utilisation des ciments. Il était donc naturel que, saisi de réclamations relatives à des anomalies observées, depuis quelques mois, dans le durcissement des bétons de chantiers, le Centre s'attachât, d'abord à préciser les singularités signalées (résistances insuffisantes et chutes de résistance), puis à faire la part des facteurs en jeu : qualité du ciment, conditions d'emploi sur chantiers, conditions du contrôle.

Une très large enquête, toujours ouverte, permettra au Centre de rassembler les informations utiles et de coordonner les recherches suscitées sur la qualité des ciments et les conditions optimum de leur emploi. Nous serions comblés si les fabricants pouvaient donner, aux entrepreneurs, le ciment de leurs rêves, peu sensible au froid, à la chaleur, à la sécheresse, insensible en un mot à toutes les variations climatiques des chantiers.

Je ne ferai que mentionner, pour terminer, les études d'ordre théorique poursuivies, entreprises ou envisagées, sous l'égide du Centre :

Constitution des ciments anhydres et hydratés.

Vitesse d'hydratation, avec le concours du *Laboratoire de Chimie de l'École Polytechnique*.

Théorie de l'insolubilité des hydrates.

Structure des pâtes et modification de cette structure au cours du durcissement.

Application des rayons X et du microscope électronique, avec le concours des services spécialisés du *Conservatoire National des Arts et Métiers* et du *Laboratoire des Ponts et Chaussées*.

Les études d'ordre théorique occupent, on le voit, une large place dans nos préoccupations ; je crains même que cette place soit trouvée excessivè à la lecture des premières publications du Centre. C'est qu'il est plus

rapidement possible de mener à bien certaines recherches de laboratoire que de préparer une documentation pratique industriellement utilisable : les recherches d'ordre pratique ne peuvent aboutir que lentement. De plus, il ne faut pas perdre de vue que c'est précisément à un Centre d'Études qu'il appartient de promouvoir et de favoriser les recherches dont l'utilité pratique n'apparaît pas immédiate, mais dont l'intérêt, sur le plan national, est incontestable.

Quoi qu'il en soit, les premières publications du Centre d'Études ont vu le jour ; elles ont été divisées en publications techniques et notes d'information. Les trois premières publications techniques sont consacrées à l'Étude des ciments aux Rayons X, à la Vibration du béton frais et à l'Hydratation et l'Hydrolyse des silicates et des aluminates de calcium en fonction de la température. Trois notes d'information sont parues ou à l'impression :

Nature et caractéristiques des Produits hydrauliques fabriqués en France ;

L'organisation du Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie des Liants Hydrauliques ;

L'utilisation des Laitiers comme source principale d'économie de combustibles en cimenterie.

D'autres études sont terminées et paraîtront à la suite :

Influence de la présence du sulfate de calcium sur la prise et la résistance des ciments silicatés ;

La cuisson sur grille ;

Les Ciments spéciaux pour barrages en France ;

Détermination de la granulométrie des ciments.

Nous espérons fermement atteindre, d'ici deux ou trois mois, le rythme normal de nos publications.

Au terme de cet exposé, ce m'est un devoir agréable d'exprimer mes sentiments de gratitude à tous ceux qui ont apporté leur concours au Centre d'Études. Si nous ne nous présentons pas aujourd'hui les mains vides, nous le devons d'abord à l'intelligente compréhension du Conseil d'Administration ; l'appui confiant, amical et constant de son Président, qui a aplani bien des difficultés, a été, pour le Directeur, l'encouragement le plus précieux. La large audience que le Centre d'Études a trouvée auprès des producteurs et des utilisateurs de ciment sera pour beaucoup aussi dans la réalisation de nos espoirs. C'est naturellement aux chercheurs, qui ont bien voulu apporter leur concours au Centre d'Études, que va notre reconnaissance ; s'il nous est quelquefois donné de pouvoir les aider, nous n'ignorons pas qu'ils sont les vrais artisans du rayonnement que peut acquérir le Centre. Enfin je n'aurais garde d'oublier les collaborateurs immédiats dont le rôle, pour être plus obscur, comme dans tout travail d'équipe, n'en est pas moins indispensable à la bonne marche de l'organisme. Que tous trouvent ici l'expression de ma gratitude. Et que le *Centre Technique Industriel*, qui succédera prochainement, selon toute vraisemblance, au *Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie des Liants Hydrauliques*, connaisse l'activité et le succès désirables !

## DISCUSSION

M. LE PRÉSIDENT. — Mesdames, messieurs, après les paroles si aimables que vient de prononcer à mon égard M. LAFUMA, j'aurais mauvaise grâce à ne pas le remercier à mon tour très chaudement de la très belle conférence qu'il vient de nous faire.

Suivant la tradition je voudrais vous demander si, les uns ou les autres, vous avez des questions à poser à l'orateur, des éclaircissements à lui demander, ou des suggestions à présenter, en ce qui concerne la politique du Centre d'études, et dont nous serions heureux de profiter.

M. MOROSINI. — M. LAFUMA vient de parler d'une question angoissante pour l'entreprise, celle de la sacherie qui doit servir à la réception du ciment. Je me rappelle que, dans mon jeune âge, on expédiait du ciment dans les colonies exclusivement dans des barils en bois; plus de 60 % du ciment était ainsi expédié dans des barils très légers.

M. LAFUMA. — Le sac-papier a le grand avantage d'être parfaitement adapté aux machines et aux différents usages. On hésite à revenir en arrière, à moins d'y être obligé, mais il est certain, d'après les données que nous avons, qu'on sera obligé en raison de l'insuffisance de papier de remplacer les sacs manquants par d'autres récipients.

M. MOROSINI. — On a parlé d'un baril métallique qui doit venir d'Amérique à des prix très abordables. Ce baril a l'avantage de pouvoir être réutilisable.

M. LAFUMA. — Il serait par conséquent amortissable sur un certain nombre de voyages. Cela serait intéressant pour les cimentiers.

M. LE PRÉSIDENT. — Il semble que ce soient les barils métalliques de 200 l qui représentent la solution la plus commode. Les divers procédés que nous avons étudiés posent des problèmes pour le transport, tandis que le baril qui roule tout seul présente des avantages.

Il existe en France un producteur qui fabrique actuellement 18 000 barils par jour; ce sont des barils pour le transport des pétroles, bien entendu, mais vu la capacité de production de cette maison, elle pourrait répondre à la demande d'une façon satisfaisante.

Il y a certainement un système à trouver au point de vue de la fermeture du baril; il faut pouvoir trouver un type de récipient qui, non seulement ne se déforme pas, mais qui puisse être réutilisé un grand nombre de fois.

M. LAFUMA. — Ce qui gêne dans cette solution, c'est que les usines qui étaient équipées pour embariller ne le sont plus. Il faudra qu'elles se rééquipent pour le réembarillage.

M. MOROSINI. — Il y a également la question du retour de ces emballages, qui constituent un gros volume, à moins de pouvoir faire un baril démontable et qui s'aplatisse. Déjà avant les sacs à papier, avec l'ancienne sacherie de jute, il y avait un gros problème et toute une comptabilité.

M. LE PRÉSIDENT. — L'idée d'un baril conique est très séduisante, mais cela doit poser une question de fabrication, il faudrait une tôle circulaire qui puisse se travailler facilement. Mais alors on ne pourrait plus rouler les récipients sur le sol.

Quant au prix on peut envisager le prix de 2 à 3 000 fr pour un baril récupérable contenant 200 l. Si on pouvait faire l'amortissement sur une quinzaine de voyages, la solution serait acceptable.

M. MOROSINI. — Il y a un brevet pour un récipient de forme hexagonale, qui contiendrait 100 kg, qui se démonte et s'aplatit très facilement.

M. LE PRÉSIDENT. — Nous serions heureux de recueillir toutes vos indications et de connaître toutes les solutions que vous pourrez nous donner; il faudra les essayer toutes.

M. MOROSINI. — Celle que je viens de vous indiquer serait relativement facile à réaliser. Il faudrait améliorer le procédé des sacs à papier par des perfectionnements complémentaires ou supplémentaires.

UN ASSISTANT. — Il faudrait obtenir une répartition meilleure du contingent de devises mis à la disposition de notre pays, afin d'augmenter les importations de pâtes à papier. Nous sommes à l'heure actuelle organisés pour utiliser des machines à ensacher. Ne pourrait-on pas intervenir auprès de l'autorité qui détient le robinet des crédits pour lui démontrer que le papier est indispensable pour les usagers.

M. LE PRÉSIDENT. — A l'heure actuelle la question du papier est devenue une question mondiale. Jusqu'à présent les États-Unis exportaient du papier, aujourd'hui ils sont obligés d'en importer. Si nous pouvions disposer des devises qui nous sont nécessaires, nous pourrions augmenter dans une certaine mesure la production du papier. Il ne faut pas dire par avance que cela est impossible. Je peux vous affirmer que nous faisons tout ce que nous pouvons, avec la Fédération des chaux et ciments, pour essayer, par des exportations, de nous procurer des devises afin de permettre une importation de pâtes à papier qui permettrait de produire les sacs dont nous avons besoin. Mais cela ne jouera jamais sur un tonnage suffisant. En effet, au cours de l'année 1947, il y a eu environ 15 à 20 % de ciment à expédier en vrac; cela représente 3 200 000 t de ciment expédié en sacs. Or, il est absolument impossible, au cours de l'année 1948, d'envisager qu'on aura plus de sacs qu'au cours de l'année 1947. S'il se produit une différence, il ne faut pas se dissimuler que ce sera une différence en moins et non pas en plus.

Au cours de l'année 1948 nous espérons que la production, au lieu d'être de 4 millions de tonnes, sera plus près de 6 millions que de 5. Ce ne sera donc plus une proportion de 15 à 20 % mais une proportion de 45 % pour laquelle les emballages manqueront.

Si nous obtenions, au moyen de devises, 10 à 15 % de sacs en plus, il y aurait encore un trou énorme à combler. Ce n'est donc pas un seul moyen qu'il faut envisager, ce sont tous les moyens. Il conviendra, non seulement d'essayer de récupérer les sacs mais encore d'augmenter la production des sacs-papier.

Il faudra aussi employer des barils métalliques, comme ceux dont il a été question tout à l'heure. Il faut également envisager l'emploi de camions, ou l'utilisation de wagons,

telle qu'elle est pratiquée actuellement, avec un système de trains-navettes, ou de camions-navettes, qui alimenteraient les gros chantiers.

Bref il faudra recourir à tous les procédés que nous pourrions trouver pour remédier à ce facteur qui limite la production des usines.

Je regrette d'être obligé de donner ces précisions attristées; malheureusement je crois qu'elles correspondent à la réalité.

## CENTRE D'ÉTUDES ET DE RECHERCHES DE L'INDUSTRIE DES LIANTS HYDRAULIQUES

### NOTES D'INFORMATION PRÉCÉDENTES

#### N° 1

*Nature et caractéristiques des produits hydrauliques fabriqués en France* (Novembre 1947), par J. CLERET DE LANGAVANT.

#### N° 2

*L'organisation du Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie des Liants Hydrauliques*, par H. LAFUMA.

#### N° 3

*L'utilisation des laitiers comme source principale d'économie de combustible en cimenterie*, par H. LAFUMA.

PUBLICATIONS TECHNIQUES PARUES

N° 1

*Étude des ciments aux rayons X*, par A. GUINIER et J. BROCARD.  
(Épuisée.)

N° 2

*La vibration du béton frais*, par R. L'HERMITE et G. TOURNON.

N° 3

*Hydratation et hydrolyse des silicates et aluminates de calcium en fonction de la température*, par J. BROCARD.

N° 4

*L'influence de la présence du sulfate de calcium sur la prise et la résistance des ciments silicatés*, par P. JOLIBOIS et A. NICOL.

N° 5

*La cuisson du ciment sur grille mobile*, par R. DICHARRY.

N° 6

*Emploi des ciments spéciaux pour barrages en France*, par J. CLERET DE LANGAVANT.

N° 7

*La mesure de la chaleur d'hydratation des ciments par la méthode Thermos*, par J. CLERET DE LANGAVANT.

N° 8

*Détermination de la granulométrie des ciments*, par P. LHOPITALIER et Ch. MOMOT.

N° 9

*Nouvelles recherches sur la gélivité des bétons. Les bétons aérés*, par M. VALENTA.

---

QUESTIONS GÉNÉRALES, N° 4

---

CENTRE D'ÉTUDES SUPÉRIEURES

SÉANCE DU 23 MARS 1948

Sous la présidence de **M. BALENCY-BÉARN**, Président de la Commission de Coordination et de Planning  
à l'Institut technique du Bâtiment et des Travaux Publics.

LES CHANTIERS

en face des problèmes de la préparation du travail

Par **M. Lucien LAURU**,

Secrétaire Général, Directeur du Bureau des Temps élémentaires.

EXPOSÉ DE M. BALENCY-BÉARN

Considérations générales. — Situation actuelle des chantiers.  
Leur caractère. — Le climat nécessaire. — L'organisation.

EXPOSÉ DE M. LAURU

Problèmes nouveaux. — Préparation du travail. — Étude de  
l'emploi d'une bétonnière. — Recherche d'une méthode de travail.  
Organisation générale du chantier. — Conclusion. — Discussion.

---

*Reproduction interdite.*

---

## ALLOCUTION DU PRÉSIDENT

### Considérations générales.

L'épuisement des réserves de notre pays, l'impossibilité de recourir d'une façon continue au crédit de l'étranger et de demander à la population un sacrifice plus lourd encore sur les biens de consommation compromettront le rééquipement français si une augmentation importante de la productivité nationale n'est pas obtenue.

Cette affirmation n'est pas nouvelle mais il apparaît maintenant d'une façon plus aiguë à nos professionnels que cette augmentation de productivité est particulièrement nécessaire dans le domaine de la reconstruction immobilière.

Elle peut être obtenue :

1° Par une diminution des frais généraux que l'abus de la réglementation et des contrôles ont si largement alourdis et que la disparition de l'initiative privée consacrée par le blocage des loyers a également contribué à aggraver;

2° Par une amélioration des techniques, de l'outillage et la recherche de procédés nouveaux.

3° Par un effort d'organisation et de production rationnelle.

L'amélioration des techniques a été le souci constant de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics dont la contribution dans ce domaine, si hautement appréciée, n'a pas besoin d'être rappelée ici.

Il s'est également penché sur la recherche de procédés nouveaux, en particulier sur la préfabrication autour de laquelle la presse a créé par ailleurs une si large émulation.

Mais il lui est apparu que l'attention n'avait pas été suffisamment attirée sur les problèmes de l'amélioration des méthodes de travail par une coordination et une préparation attentive des opérations de chantier.

Il a donc créé un service spécialement chargé d'analyser les causes de notre retard dans ce domaine et de proposer des solutions pratiques, c'est en son nom que je prends la parole aujourd'hui.

### Situation actuelle des chantiers.

On entend souvent répéter que notre époque est une époque d'organisation; c'est un fait que dans un très grand nombre d'industries un abaissement extrêmement

important des prix de revient a pu être obtenu (sans que les conceptions techniques aient été bouleversées) par le simple effet d'une production bien organisée.

Cet effet de l'organisation nous est clairement apparu dans le domaine de l'automobile par exemple.

Or, si les chantiers ont profité de matériels ou de matériaux nouveaux, ils sont par contre restés en marge de cette évolution.

Pourquoi nos entreprises sont-elles en retard sur le plan de l'organisation? Cela tient, je crois, au caractère très spécial des chantiers et en particulier de ceux de bâtiment.

### Le caractère des chantiers.

L'activité des chantiers est déjà fortement marquée par l'influence des intempéries qui par leur caractère imprévisible apportent un premier obstacle au déroulement normal des opérations.

En outre, si, pour la grosse majorité des industries, l'industriel peut se saisir de l'ensemble du problème d'une fabrication, il en est tout autrement sur les chantiers pour lesquels interviennent tout au long de leur durée : le client, l'architecte ou le conseiller technique du client et les entrepreneurs souvent fort nombreux.

Le client français a été habitué à exiger du « sur mesure ». Il faut reconnaître que cette prétention est généralement justifiée par l'adaptation nécessaire aux conditions locales (topographie, géologie, climat, matériaux, etc.) ou au programme particulier; mais nos clients formulent volontiers aussi, en cours de travaux, des exigences qui sont dictées par un simple souci d'originalité ou par des changements de vues que leur suggère l'œuvre en cours. Ils veulent du « sur mesure » mais ils veulent aussi de nombreux « essayages » avec des repentirs et des retouches pendant l'exécution.

Il faut ajouter à ces difficultés celles résultant des exigences administratives tardivement révélées, des arrêts provenant de déficiences d'approvisionnement provoquées elles-mêmes par la pénurie ou l'insuffisance des stocks de sécurité que le caractère encombrant ou périssable des matériaux rendent d'ailleurs difficiles à constituer.

Chaque chantier est ainsi un véritable prototype et qui plus est un prototype édifié sur un programme en continuel changement.

Cet aspect est particulièrement frappant dans le bâtiment où l'Architecte apporte en outre le tourment de la création artistique qu'il aborde avec son tempérament particulier. Il faut reconnaître d'ailleurs que le souci de l'œuvre d'art accomplie exige des retouches que suggère nécessairement le vu des volumes réalisés. Il est impossible de tout voir sur plans ou sur maquettes.

Pour répondre à ces données, les entrepreneurs rarement groupés dès le début de la construction et dans l'impossibilité de s'entraîner en équipe ont dû adopter des méthodes de travail permettant de satisfaire, je dirai au jour le jour, à des problèmes changeants; c'est ainsi que s'est développé l'aspect très particulier des chantiers.

Pour être juste, il faut dire tout de même que, pour la construction des immeubles à loyer en face desquels la personnalité du client intervient moins que pour des constructions particulières, des architectes ont su, avec le concours des mêmes entrepreneurs entraînés, et après avoir éprouvé leurs vues artistiques sur des répétitions antérieures, réaliser lorsque l'approvisionnement était plus facile des constructions à peu près exemptes de retouches et d'un prix de revient tout à fait intéressant. L'organisation restait toujours simple et robuste avec une large part d'initiative individuelle, une tradition tenait lieu de préparation du travail.

Sans vouloir nier les progrès considérables qui d'évidence restent à accomplir et qui sont le but de nos recherches, il convient de s'élever contre la façon dont sont présentées certaines affirmations parues dans la presse relatives au coût « heures de travail » de la construction en France et à l'Étranger. Il est annoncé sans autre commentaire : 25 000 h en France pour une maison de quatre pièces, 9 000 en Angleterre, 4 500 aux États-Unis.

Il faudrait dire au lecteur si l'on compare une maison en pierre de taille édifiée pour un siècle à une tente de campement, par conséquent dire si l'on fait intervenir le caractère artistique et la durée de la construction, et fixer également l'amortissement des machines employées, le caractère plus ou moins œuvré des matières premières, ainsi que la proportion de travail de bureau ou d'usine par rapport à celui de chantier.

Je crois, au contraire, de l'affirmation précédente, que l'entreprise française pour des œuvres de caractère adapté que j'ai appelé du « sur mesure » soutenait, par la qualité de ses exécutants et de ses cadres ainsi que par les qualités bien françaises d'initiative, et soutient encore la comparaison des entreprises étrangères.

C'est ainsi que dans le domaine des travaux publics notamment elle est encore si recherchée hors de France.

Elle s'adapterait à d'autres conceptions si un climat convenable lui était créé.

#### Les conditions d'après-guerre.

La disparition de la clientèle privée a rendu plus difficile encore l'entraînement de groupes d'architectes et d'entrepreneurs qui avaient pris l'habitude de travailler en commun.

En effet l'adjudication pure et simple est la règle, et un chantier n'est plus que la rencontre occasionnelle d'entrepreneurs qui s'ignoraient auparavant et qui, de plus, sont rarement choisis en même temps.

Des recherches nouvelles ont bousculé la tradition sans la remplacer encore par une organisation de caractère plus scientifique.

De plus, le caractère mouvant des programmes au lieu de s'atténuer s'est au contraire largement aggravé depuis la guerre. Cela tient à l'instabilité actuelle de toutes choses. Incertitude des approvisionnements conduisant à des changements de matériaux en cours d'exécution, instabilité des prix conduisant aussi à des remaniements de programmes, données politiques et sociales changeantes.

Le client administratif a souvent les défauts aggravés de la clientèle particulière. La décision est plus difficile à obtenir car elle met en jeu des administrations voisines, des groupements très variés, des règlements particulièrement touffus et changeants.

L'entrepreneur soucieux de perfectionner ses méthodes se sent pris d'un véritable désespoir. Les modes de marché eux-mêmes sont contre lui. Que voyons-nous dans la majorité des cahiers des charges :

Le changement y est considéré comme la règle puisque l'entrepreneur n'est pas fondé à réclamer si on l'ampute du 1/4 ou du 1/6<sup>e</sup> des travaux prévus ou si on lui en ajoute autant.

L'ajournement inférieur à une année n'est pas considéré comme préjudiciable, les retards de paiement du client ne sont pas davantage sanctionnés, la responsabilité de l'Administration détentrice de bons matières pour l'approvisionnement est rarement précisée.

Si bien que, s'ils veulent sauvegarder leur agence ou leur entreprise, l'architecte ou l'entrepreneur doivent renoncer à engager les frais d'une préparation qui a les plus grandes chances d'être bousculée, il ne leur reste plus qu'à s'adapter à ce climat désordonné en tirant le meilleur parti possible des changements.

Devant cette impossibilité quasi-générale de tenter avec quelque chance de succès une organisation des chantiers qui pourrait en faire une véritable industrie « sur le tas », des professionnels ont pensé tout simplement à les supprimer ou du moins à en faire un simple lieu de montage, la fabrication étant transportée en usine fixe.

Ainsi s'est développée la tendance à la préfabrication qui a provoqué un si grand engouement.

On peut penser, en effet, que si un client peut aller chez son carrossier modifier la dimension de la portière qu'il avait arrêtée pour sa voiture et qui a cessé de lui convenir, il ne lui viendra tout de même pas à l'idée et pas davantage à son conseiller artistique d'arrêter une chaîne de fabrication pour une voiture de grand usage qu'il a d'ailleurs déjà vue et essayée.

L'argument est de poids et quoique des exemples récemment portés à notre connaissance prouvent qu'il n'en est pas encore tout à fait ainsi dans les premiers essais, nous croyons en effet que si une fabrication en série d'éléments ou d'ensembles préfabriqués était mise au point elle soustrairait rapidement la construction de nos maisons non seulement aux intempéries mais encore aux changements qui les accablent.

De plus toute opération répétée en usine ouvre des perspectives beaucoup plus vastes dans la voie de l'amélioration de la productivité qu'une opération de chantier.

Cependant cette préfabrication se heurte encore à des problèmes ardu de technique et d'équipement industriel. A l'engouement peut-être excessif des premiers essais a succédé une critique que quelques déboires en France comme à l'Étranger ne justifient pas.

Quoi qu'il en soit, la préfabrication totale ne peut résoudre tous les problèmes du logement. Si elle apporte une discipline salubre elle soulèvera toujours des difficultés d'adaptation au sol ou aux emplacements disponibles. Une certaine résistance de l'opinion reste à vaincre.

La construction sur le chantier faisant un appel raisonnable aux préparations en atelier, régénérée par l'apport de matériaux ou de techniques nouvelles, peut largement jouer sa partie et la gagner dans la lutte du prix de revient. Une organisation rationnelle peut y être génératrice d'économies considérables.

### Le climat nécessaire.

Mais pour cela il faut qu'un climat rénové permette de rendre rapidement rentable une organisation nécessairement coûteuse.

Nous sommes trop appauvris pour nous payer du « sur mesure » avec « essayages et retouches ». En attendant que le préfabriqué nous apporte de la « confection » ou du « prêt à porter » de qualité (et ne voyons dans ces termes rien de péjoratif car la série est loin d'être synonyme d'ennui ou de basse qualité), cherchons à nous payer du « sur mesure » mais sans changements et sans exiger la coupe originale qui nous ferait d'ailleurs inutilement remarquer.

C'est dire qu'il faudra définir les programmes et s'interdire ensuite les changements même si nous passons à côté de la perfection totale. Il faut savoir vivre avec ses erreurs jusqu'à l'expérience suivante. Enfin, il faudra sans tomber dans la série indéfinie s'astreindre à certaines disciplines en recherchant les répétitions qui facilitent singulièrement l'étude des méthodes de travail. Il y a une marge considérable entre la série fastidieuse et la fantaisie débridée.

Si le climat peut être créé (stabilité des programmes, répétitions, assurance d'un financement et d'un approvisionnement réguliers), les professionnels qui veulent s'organiser pourront le faire sans risquer d'exposer une préparation du travail inutile.

### Savoir s'organiser.

Ce climat de stabilité étant créé, il ne faudrait pas penser que l'abaissement du coût de la construction s'en suivra immédiatement.

Il ne suffit pas de vouloir s'organiser et de pouvoir le faire, il faut encore savoir, et cela exigera du temps et de la persévérance.

Des industries plus évoluées que la nôtre ont mis de nombreuses années avant de mettre sur pied des bureaux de méthodes efficaces. Comment penser que nous y réussirons du premier coup.

Une entreprise « organisée » se manie au reste moins facilement qu'une entreprise à base d'initiative individuelle. Si une bonne « organisation » peut être génératrice d'économies surprenantes, une mauvaise « organisation » peut compromettre une exploitation.

Les entreprises devront faire appel pour rattraper leur retard à des expériences acquises dans d'autres métiers.

J'ajoute que des études préparatoires devront être entreprises sans tarder. Elles sont trop coûteuses pour pouvoir être supportées par un seul entrepreneur, au demeurant cela donnerait lieu à des répétitions inutiles. Nous pensons donc que l'ensemble de la profession devrait centraliser de telles recherches.

On peut envisager deux degrés d'organisation :

1<sup>o</sup> *Préparation ou planning de chantier* pour lequel les renseignements d'ordre statistique que possèdent les entreprises permettent une mise en ordre suffisamment précise des opérations. Un tel travail serait grandement facilité par la constitution de « d'équipes » que le Ministère de la Reconstruction a très justement suscitées dans son dernier concours auquel il ne manquait que le support d'une réalisation précise définissant le lieu d'exécution et les nécessités locales.

Cette notion d'équipe est extrêmement importante, il est en effet anormal, nous le répétons, qu'un chantier soit la rencontre occasionnelle d'un architecte et d'un groupe d'entrepreneurs qui s'ignoraient avant l'adjudication. Les membres de l'équipe doivent pouvoir se choisir et perfectionner ensemble leurs procédés sous une direction unique en travaillant d'une façon continue sur un programme important et de durée. Les délais et moyens d'expérimentation doivent leur être accordés.

2<sup>o</sup> *Étude des postes de travail.* — Les valeurs d'ordre statistique que possèdent les entreprises sur le rendement moyen de la main-d'œuvre pour une opération déterminée sont insuffisantes.

Elles ne permettent pas une mise en ordre des méthodes de travail; de plus, l'intéressement indispensable de la main-d'œuvre ne peut se faire sur des moyennes. Les Temps élémentaires des opérations devront être recherchés au moyen de chronométrages. Ce travail permettra seul de tirer tout le bénéfice de la préparation prévue au premier degré.

Des techniciens spécialisés se sont déjà penchés pour d'autres industries sur les problèmes d'organisation et de méthodes. Leur concours nous sera utile. Un certain nombre d'entre eux ont d'ailleurs une expérience des chantiers. Les bureaux de MM. PLANUS, VIDAL, RODÉ, le Bureau des Temps élémentaires et j'en oublie certainement, ont déjà abordé ces problèmes.

Nous demanderons à ceux qui le voudront bien de se faire entendre à cette tribune.

L'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics vous présente aujourd'hui M. LAURU, Directeur du Bureau des Temps élémentaires, qui a bien voulu nous exposer le sens de ses recherches et les travaux que son organisme a déjà entrepris pour le bâtiment.

## EXPOSÉ DE M. LAURU

L'industrialisation et le développement des techniques ont posé des problèmes d'organisation nouveaux qui ont pu être résolus, au moins partiellement, dans beaucoup de professions, telles que la Mécanique, l'Aéronautique ou l'Automobile. La question préalable se pose de savoir si les méthodes appliquées dans ces branches industrielles sont valables pour le travail du chantier.

Ces branches sont en effet relativement jeunes; elles n'ont que peu ou pas d'habitudes et de routines à vaincre pour s'adapter à de nouvelles méthodes d'exécution. Au contraire, le travail de chantier, surtout dans le Bâtiment, est encore, dans bien des cas, à l'état artisanal et vit sur des coutumes millénaires.

On peut objecter aussi que le Travail de chantier présente des caractéristiques profondément différentes de celles du travail industriel, et c'est en partie exact.

L'un est tributaire des conditions atmosphériques et l'autre ne l'est pas. On surveille mieux un chantier qu'un atelier, c'est vrai. Il y a beaucoup de petites entreprises de 3 ou 10 compagnons, c'est exact; mais il est non moins exact que sur 15 000 entreprises de mécanique générale 90 % emploient moins de 50 ouvriers.

Ces difficultés doivent-elles s'opposer à toute évolution des procédés de travail ? Nous dirons : NON.

Dans toutes les professions, quels qu'en soient les instruments, il y a des hommes et, dans l'exécution, se rencontre toujours et surtout un problème humain, le problème de l'« Utilisation de l'homme ».

Comment le résoudre ?

Il n'existe qu'un seul chemin : l'étude du travail, qui a pour corollaire la préparation du travail.

Pour le travail en chantier, celle-ci peut paraître *a priori* une espèce de monstre inquiétant qui suscite sans doute de l'intérêt, mais aussi beaucoup d'appréhensions; appréhensions qui vont se manifester sous un triple aspect :

A. La préparation du travail est-elle rentable ?

B. Quelle sera la réaction des chefs de chantiers et des ouvriers ?

C. Où trouver des techniciens capables de faire la préparation du travail.

Avant de discuter ces trois aspects, il semble nécessaire de préciser brièvement par de brefs aperçus ce que l'on peut entendre par la *préparation du travail*.

Viendrait-il à l'esprit de quelqu'un d'entre nous :

a) Que l'on puisse voter sans que les listes électorales aient été imprimées à l'avance, de telle sorte que le votant n'ait plus qu'à rayer un ou deux noms et à plier une feuille avant de la mettre sous enveloppe et de la déposer dans

l'urne, en un mot sans que le travail de l'électeur ait été préparé ?

b) Qu'en raison de notre parfait entraînement à rédiger nos déclarations de revenus (qui se perfectionnent en tous sens chaque année), l'Administration nous invite à les faire sur papier libre, s'abstenant de « préparer le travail » du contribuable ?

c) D'attendre les demandes du chef de chantier pour approvisionner en briques, par exemple, un chantier qui doit s'ouvrir le lendemain ?

d) D'attendre pour expédier des éléments de voie de 0,60 destinés à une bétonnière devant fonctionner dans des conditions normales, que le chantier soit mis en route et que son chef ait ensuite défini la longueur nécessaire ?

e) D'attendre d'avoir besoin des éléments d'une baraque en bois pour s'apercevoir que le déchargement a été mal exécuté et qu'il faut une équipe de 3 ou 4 hommes pour remettre les éléments en place dans leur ordre d'utilisation avant d'attaquer le montage ? Les inconvénients du manque de préparation sont flagrants dans ces derniers exemples.

\*\*\*

Arrêtons ici l'énumération, mais reprenons le dernier cas : il s'applique à beaucoup de travaux du chantier et sa solution ne demande qu'un peu de réflexion.

Il peut certes se compliquer à l'extrême, mais considérons-le sous sa forme la plus simple :

Une entreprise exécute aux dimensions données les éléments de la baraque;

Une autre entreprise exécute les fondations et le montage.

Examinons ce qui devrait être fait par l'entreprise de montage :

1<sup>o</sup> Déterminer le ou les lieux de dépôt des éléments en fonction de l'emplacement de montage;

2<sup>o</sup> Déterminer l'ordre dans lequel elle utilise les éléments et en conséquence l'ordre dans lequel doit s'opérer le déchargement;

3<sup>o</sup> Indiquer cet ordre à l'entreprise chargée de les fournir.

Pour un type de baraque donné ce travail peut demander au maximum 5 ou 6 h à un technicien. L'économie se chiffrera par 4 ou 5 h pour une équipe de 4 hommes, soit 16 à 20 h par baraque, correspondant à un potentiel de production jusque-là entièrement gaspillé.

Il serait facile de trouver bien d'autres exemples de travail ainsi dépensé en pure perte. Le total en serait impressionnant.

.\*.\*

En bref, la préparation du travail peut se décomposer en trois stades :

1<sup>o</sup> Étude des éléments ayant une répercussion sur l'exécution du travail;

2<sup>o</sup> Détermination de l'organisation optimum, compte tenu de l'influence relative de ces éléments;

3<sup>o</sup> Prise de toutes les dispositions utiles pour que le chef de chantier dispose en temps opportun :

Des données et plans nécessaires à son action et des instructions détaillées pour chaque partie du chantier;

Du matériel et outillage nécessaires en qualité et quantité;

Des matières premières;

Des équipes de main-d'œuvre correspondant aux besoins résultant des instructions détaillées.

Par cette méthode, nous aurons une connaissance précise des tâches qui permettra de rétribuer chacun de façon équitable, la vie et la santé des travailleurs étant garanties et leur tâche facilitée; par-dessus tout nous éviterons le gaspillage des forces.

.\*.\*

Mais n'oublions pas que toute tentative de réformes, si logiques, si ingénieuses soient-elles, qu'il s'agisse du travail d'un ouvrier, d'un groupe d'ouvriers, d'une entreprise, d'un matériel ou d'un système d'exploitation est vouée à l'échec si elle ignore délibérément les besoins et les qualités de l'homme, maître de toute production.

Ayant ainsi tenté de nous faire une idée de ce qu'est la préparation du travail dans ses buts et dans ses moyens, nous allons essayer de répondre aux trois questions que nous nous posions en commençant.

.\*.\*

*Et d'abord la préparation du travail est-elle rentable ?* Les exemples déjà cités répondent en partie à cette question. Il serait aisé de les multiplier : la fin de cet exposé sera d'ailleurs consacrée à l'étude complètement détaillée d'un cas particulier.

Mais je voudrais ici répondre à cette objection de principe, que le *Bâtiment n'est pas une profession comme les autres*.

Si vous saviez combien de fois j'ai entendu un propos analogue, non seulement dans la bouche d'entrepreneurs, mais dans celle de mécaniciens, de forgers, de fondeurs... et pourtant ces branches professionnelles font aujourd'hui de la préparation du travail. Malheureusement il y a comme un voile qui limite trop souvent à la vue des uns les réalisations des autres. Nous allons nous efforcer de le soulever.

Pour rester dans une complète objectivité, je pense que vous serez d'accord avec moi pour admettre que la préparation du travail est rentable dans l'automobile, dans la mécanique, l'aéronautique, en un mot dans toutes les professions d'ateliers. Mais les chantiers ? direz-vous.

.\*.\*

C'est précisément d'un chantier que je vais parler, d'un chantier de constructions navales.

Ne croyez pas surtout que la préparation du travail y a été introduite récemment. Que non ! Elle y est pratiquée depuis le début du siècle mais c'est seulement depuis la fin de la guerre qu'elle prend un essor de plus en plus grand.

Cet essor n'a cependant pas été aussi rapide qu'en Amérique où, pendant la guerre, on a rompu avec les procédés traditionnels, ce qui a fait faire un bond énorme à la construction des navires.

En France, nos chantiers se butaient au traditionalisme; l'organisation et la préparation du travail n'y pénétraient que lentement. De l'autre côté de l'Océan, on est entré dans la voie nouvelle délibérément et sans arrière-pensée. Il a été construit des navires *avec des éléments préfabriqués*, et d'un seul coup les constructeurs ont compris le parti qu'ils pouvaient tirer de cette évolution.

Immédiatement les techniques en usage dans les branches professionnelles les plus évoluées ont été utilisées. Leur développement dans les chantiers navals a été extrêmement rapide; elles ont seules permis les réalisations impressionnantes que vous connaissez et qui ont été un élément essentiel de la victoire alliée.

Actuellement ces chantiers continuent à produire des bateaux à des prix très inférieurs aux nôtres, bien que travaillant sur nos plans. Les mêmes bateaux sont faits dans notre pays : la comparaison des prix et des délais de livraison est facile.

Or, les industriels américains n'ont certes pas horreur de « faire du dollar » pas plus que les entreprises de mécanique d'automobile ou d'aéronautique ne voudraient gaspiller leurs bénéfices en études vaines.

Il y a donc là un élément de rentabilité.

.\*.\*

Mais attention ! Sans doute faudra-t-il, pour en tirer profit, abandonner en partie les procédés traditionnels. Si beaucoup de chantiers navals ne produisent encore que bien lentement — malgré l'ampleur et l'urgence de la demande — c'est que leurs prix et leurs délais de livraison sont trop élevés, parce qu'ils sont encore trop étroitement attachés à ces procédés.

Le passage aux méthodes industrielles a permis aux uns d'augmenter leur potentiel dans de très grandes limites : il menace de faire disparaître les autres, les traditionnels.

Il est indiscutable que les industriels américains disposent de moyens financiers d'une rare puissance. Ils peuvent essayer bien des choses, faire individuellement des recherches et des études concernant la productivité d'un atelier ou d'un chantier.

La France est pauvre et nos industriels ne peuvent dépenser beaucoup en études et recherches. C'est pourquoi celles-ci doivent être poursuivies, à notre sens, *sur le plan professionnel, de telle sorte que chacune de ces études puisse servir à tous*. Il faut ajouter, en outre, qu'étant

pauvres, nous ne pouvons nous permettre de nous tromper, c'est-à-dire de faire des expériences coûteuses ou malheureuses. Et il nous faut gagner à notre cause, non seulement le personnel de direction, mais aussi le personnel d'exécution, chefs de chantiers et ouvriers.

Et ceci nous amène à la deuxième question.

\*\*\*

*Quelles seront les réactions de nos chefs de chantiers et de nos ouvriers ?* Nous répondrons à cette question par une autre : Savez-vous quelles ont été les réactions des ouvriers, chefs d'équipes, contremaîtres, chefs d'ateliers dans les autres branches, lorsque la préparation du travail y a été introduite ?

Elles ont été ce que vous pouvez imaginer et parfois violentes. Puis, l'organisation pénétrant progressivement, tout s'est aplani et la vie de l'entreprise reprenait sur un nouveau rythme.

L'organisation en effet ne peut et ne doit être qu'une évolution respectant les lois naturelles. Ce n'est pas un procédé magique, une recette. C'est un nouvel esprit, le passage de l'empirisme à la science, de la politique personnelle à la saine franchise, à la parfaite intégrité, à un sens moral chaque jour plus élevé, depuis le plus humble manœuvre jusqu'aux cadres supérieurs.

Entreprendre l'organisation rationnelle sans rechercher cet esprit c'est courir à l'échec.

\*\*\*

Les hommes groupés dans une entreprise sont capables des meilleurs dévouements, mais aussi des pires excès.

L'homme, est, en effet, un mélange de sentiments les plus divers qui se manifestent souvent d'une manière inattendue.

Il est donc nécessaire de prévenir ces mouvements et c'est pourquoi il faut à tous ces hommes rassemblés pour le travail :

*Des guides.* — Ce sont ceux qui, du plus petit au plus grand, vivent avec lui, et qui, par leur formation intellectuelle et morale, savent se placer en tête et savent s'y faire reconnaître;

*Des tâches bien définies,* équitablement réparties et rémunérées en fonction de la qualification de chacun. Toutes frictions doivent être évitées, car ces hommes sont doués d'une intelligence, d'un cœur, ces hommes vivent, ont des sentiments, aiment ou détestent, peuvent être heureux ou malheureux, mais à coup sûr, *peinent* et souffrent.

En fait, il ne suffit pas de prendre les meilleurs matériaux, les meilleurs machines, conduites par les meilleurs ouvriers, pour aboutir au *meilleur produit*. Il faut entraîner les hommes au travail volontaire et spontané en transformant l'atmosphère du travail par des procédés autres que ceux de la contrainte (Hyacinthe DUBREUIL).

Le bon ouvrier est fier de son travail. Il sait apprécier ce qui est bien fait, que ce soit par un ouvrier comme lui, ou bien par un technicien, un ingénieur ou un patron.

Il est attiré vers la technique de son métier et sait reconnaître les bienfaits de cette technique, mais il faut lui donner toutes explications utiles qui sont à sa portée. Il n'est pas jaloux du savoir; bien au contraire, il désire de tout son être y participer et en acquérir sa part.

Il faut, en outre, rechercher le plus possible à utiliser les réactions intelligentes de l'ouvrier en même temps que ses qualités manuelles. En effet, nous constatons fréquemment que dans une entreprise bien organisée, où l'étude du travail a redonné toute confiance à l'ouvrier, les meilleures suggestions quant aux détails sont fournies par le personnel exécutant et placent ainsi celui-ci en collaboration directe avec le technicien. L'expérience de l'un fournit à l'esprit d'analyse de l'autre les éléments nécessaires à tout progrès.

Et nous arrivons ainsi à la troisième question.

\*\*\*

*Avons-nous, dans le bâtiment, des techniciens capables de faire cette préparation du travail ?* La première réponse qui vient à l'esprit est de dire : NON ! car les techniciens que possède le bâtiment sont orientés vers des tâches autres que celle-ci. Toutefois, nous pouvons dire que le bâtiment possède, en partie, les éléments nécessaires pour former de tels techniciens.

Ce problème s'est d'ailleurs posé de la même manière, avec la même acuité, dans les industries telles que la mécanique, l'automobile, l'aéronautique, etc...

Nous avons pallié ce manque de techniciens en créant le *Cours supérieur d'étude du travail* qui forme, pour l'industrie, des *Agents d'étude du travail*, des *Agents de méthode*, et qui organise également des conférences d'information des cadres, permettant ainsi d'initier tout le personnel des entreprises à ces nouvelles méthodes.

A titre indicatif, le *cours supérieur d'étude du travail* a formé pour les différentes branches industrielles françaises, pendant la session 1946-1947, plus de 1 100 ingénieurs et techniciens de ces problèmes.

Vous voyez donc que ce problème n'est pas spécifiquement un problème du *Bâtiment*, c'est un problème qui intéresse notre industrie tout entière.

Je tiens à préciser ici, que nous sommes à la disposition des entreprises pour leur former, par l'intermédiaire de notre *cours supérieur d'étude du travail*, les premiers techniciens qui leur sont nécessaires, c'est-à-dire des *agents d'étude du travail*, en vue d'observer et d'analyser les opérations qui se font sur leurs chantiers, afin que le chef d'entreprise puisse en déduire toutes directives utiles pour la bonne marche des chantiers.

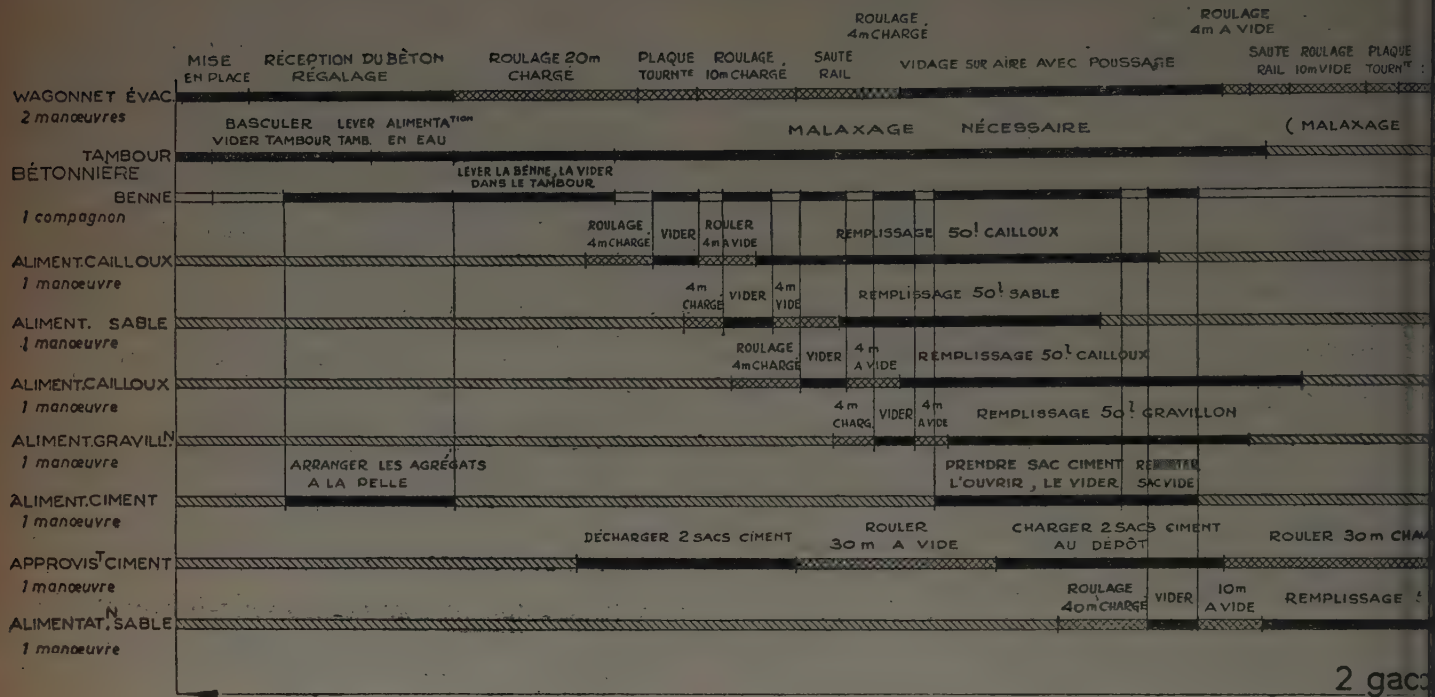
Voici, Messieurs, résumée aussi brièvement que possible, la question de la préparation du travail dans le Bâtiment ainsi que les efforts que la profession du bâtiment a à entreprendre pour pouvoir mener à bien cette tâche.

\*\*\*

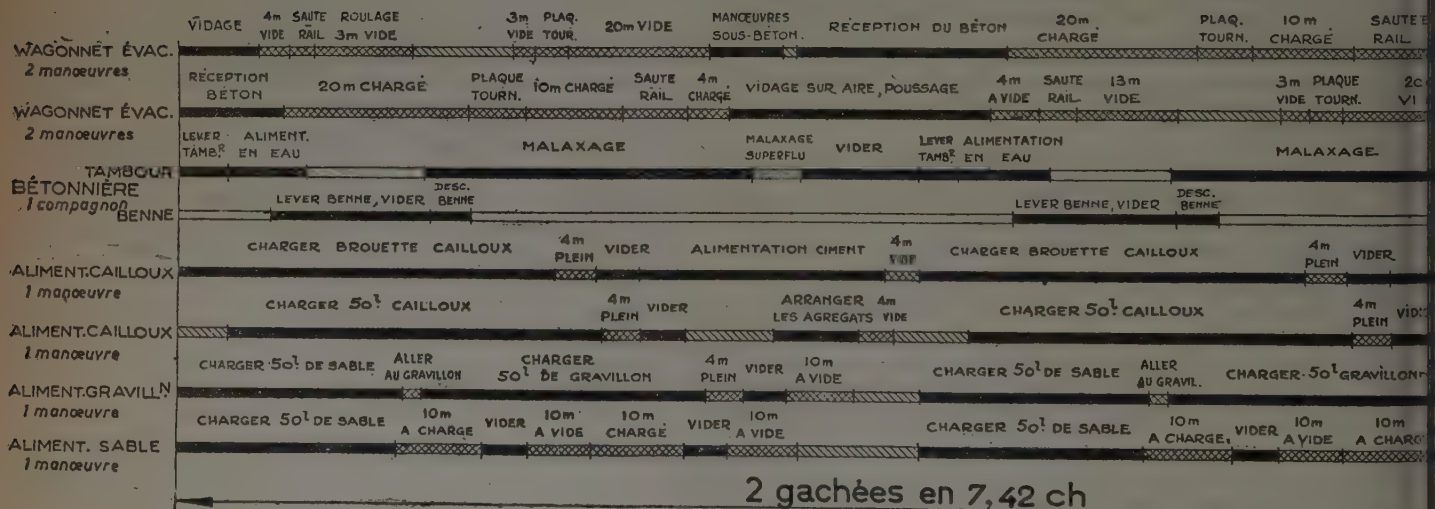
Pour achever de vous convaincre, il nous reste à illustrer ces considérations théoriques par l'application à des exemples concrets de nos méthodes et de nos documents.

# BÉTONNIÈRE

## I. MODE DE TRAVAIL OBSERVE

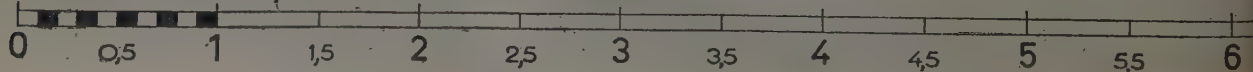


## II. MODE DE TRAVAIL AMÉLIORÉ



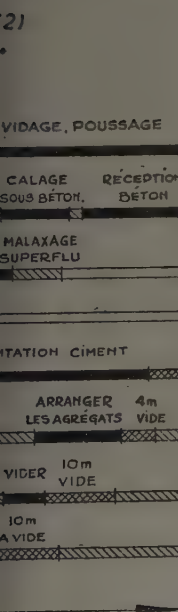
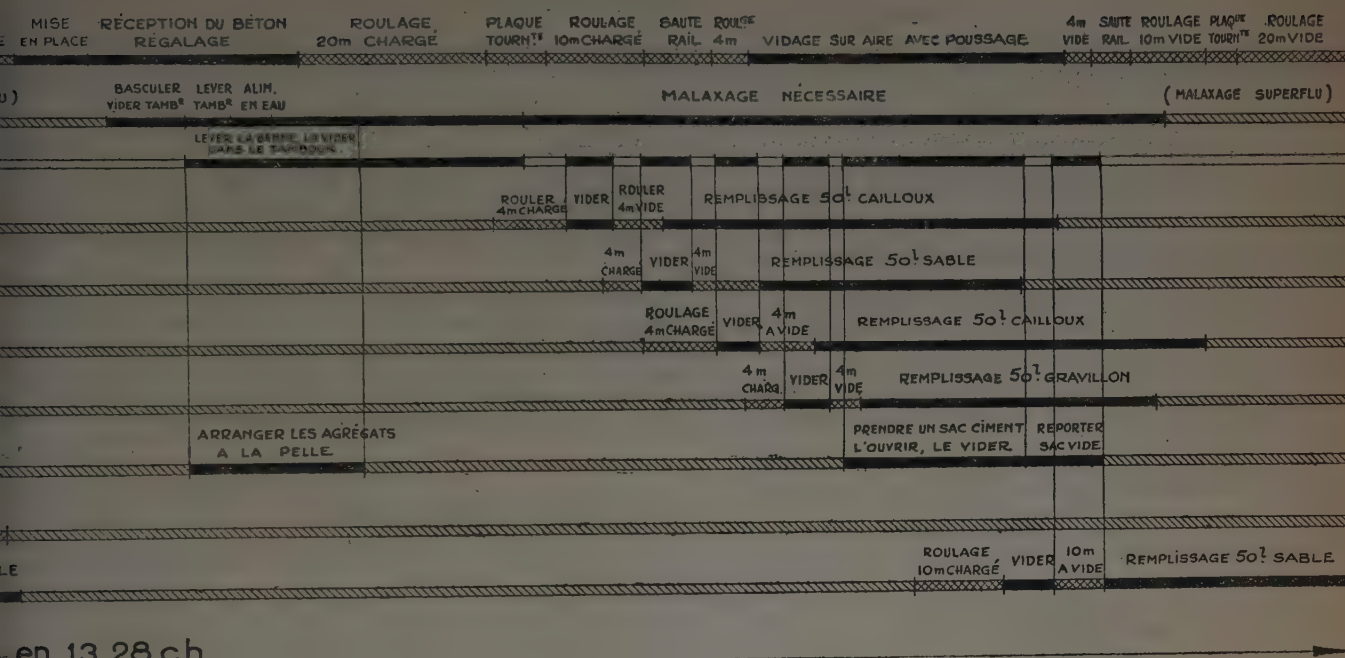
DÉCHARGER 2 SACS CIMENT ROULER 30m A VIDE CHARGER 2 SACS CIMENT ROULER 30m A CHARGE

Echelle des temps en centièmes d'heure



# RICHER 36 C.

UR UN CHANTIER.<sup>(1)</sup>

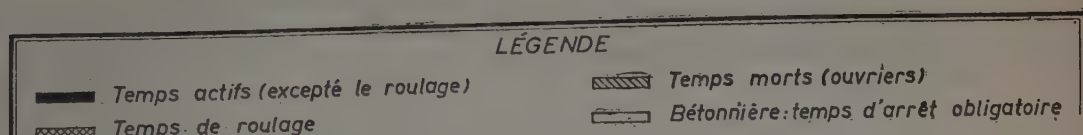


<sup>(1)</sup> ÉQUIPE DE 10 OUVRIERS (évacuation par un wagonnet)

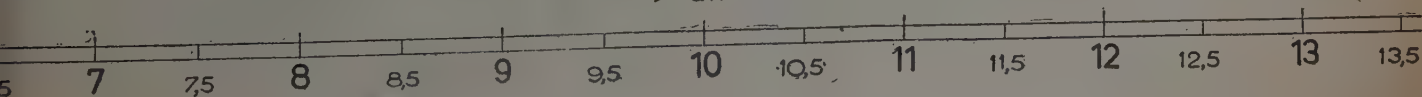
1 gachée en 6,64 ch  
par gachée 66,40 ch d'ouvrier

<sup>(2)</sup> ÉQUIPE DE 9 OUVRIERS + 1 OUVRIER UTILISÉ PARTIELLEMENT  
(évacuation par deux wagonnets)

1 gachée en 3,71 ch  
par gachée 35,79 ch d'ouvrier



ÉLIORATION PROPOSÉE PERMET → une diminution de temps d'exécution de 44%  
→ une diminution de main d'œuvre de 46%



### Étude de l'emploi d'une bétonnière.

Le dossier de la Bétonnière RICHIER type 36 C (n° 46 041)  
(voir fig. 1 et 2);

**Le dossier-chantier (n° 47 069) (voir fig. 3 et 4).**

— La fiche caractéristique de la bétonnière, donnant par tableaux et croquis la description de la machine, la nomenclature de ses organes et ses caractéristiques dimensionnelles (p. 1 et 2).

— L'aménagement du poste de travail, indiquant les dispositions optima à prendre pour sa mise en fonctionnement (p. 3 et 4).

— La nomenclature de l'outillage et de l'appareillage indispensables (p. 5).

— Enfin, un tableau de temps élémentaires codifiés (p. 6).

Quelques éclaircissemens sont nécessaires au sujet du dernier tableau.

Il comprend tous les mouvements en lesquels peuvent se décomposer toutes les opérations nécessaires au cours du fonctionnement de la bétonnière avec leur valeur en temps.

D'après la méthode B. T. E. et la définition psychophysiologique du mouvement élémentaire, la propriété de base de ce dernier est la suivante : « A un mouvement élémentaire codifiable correspond un temps élémentaire directement utilisable quel que soit le mouvement qui le précède et celui qui le suit. »

Reproduction interdite

FIG. 1.

6

**FIG. 2.**

Tableaux de temps élémentaires Wagonnets en centièmes d'heures					
Vidage de wagonnets à benne basculante					
Contenance du wagonnet	300l.	500l.	750l.	Main d'O.	
Désignation					
Vider sur aire wagonnet de béton	1,30	1,60	1,90	2m	
Vider dans benne d'alimentation de bétonnière wagonnet d'agréats	0,39	0,45	0,60	2m	
Vider sur goulotte (plan incliné) wagonnet de béton	0,90	1,10	1,30	2m	
Vider wagonnet de terre (voie en déblai)	1,80	2,20	2,60	2m	
Vider wagonnet de terre (voie en remblai)	1,65	2,10	2,50	2m	
Pivotement de wagonnet sur saute-rails et plaque-tournantes					
Contenance du wagonnet	à vide	300l de	500l de	750l de	Main d'O.
Désignation		béton ou terre	béton ou terre	béton ou terre	
Pivoter sur plaque-tournante (1/2 tour)	0,16	0,29	0,35	0,48	2m
Pivoter sur saute-rails (1/2 tour)	0,21	0,33	0,42	—	2m
NOTA : M. d'O. = main d'œuvre - C = compagnon - M = manœuvre BUREAU DES TEMPS ÉLÉMENTAIRES IMMATRICULATION N° 47069 Août 1947					

FIG. 3.

Tableaux de temps élémentaires Wagonnets en centièmes d'heure					
Transport par wagonnets à benne basculante (voies de 0,40 M. à 0,60 M.)					
Contenance du wagonnet	à vide	300 Litres de Béton	500 Litres de Béton	750 Litres de Béton	M. d'O.
Désignation					
2	0,09	0,13	0,20	0,29	2m.
4	0,16	0,22	0,29	0,36	2m.
5	0,19	0,26	0,32	0,40	2m.
6	0,23	0,31	0,36	0,44	2m.
8	0,30	0,40	0,47	0,55	2m.
10	0,36	0,50	0,59	0,69	2m.
15	0,55	0,72	0,83	0,97	2m.
20	0,73	0,95	1,10	1,28	2m.
25	0,90	1,20	1,40	1,65	2m.
30	1,08	1,42	1,65	1,93	2m.
35	1,25	1,65	1,91	2,25	2m.
40	1,43	1,87	2,16	2,53	2m.
45	1,60	2,08	2,40	2,80	2m.
50	1,76	2,28	2,63	3,06	2m.
NOTA : M. d'O. = main d'œuvre - C = compagnon - M = manœuvre BUREAU DES TEMPS ÉLÉMENTAIRES IMMATRICULATION N° 47069 Août 1947					

FIG. 4.

C'est cette dernière propriété qui permettra de calculer le temps d'une opération quelconque par addition de ses éléments.

La structure du tableau est la suivante (voir fig. 2).

Dans la colonne « désignation » figure la définition du mouvement, dans la colonne « code » son numéro qui permettra de l'indiquer commodément en abrégé au cours des calculs, dans la colonne M d'O, le nombre d'ouvriers correspondant avec l'indicatif C pour les compagnons et l'indicatif M pour les manœuvres. Enfin, nous trouvons deux colonnes « Temps » ; temps tarifé et trt (temps réel de travail). Il convient ici de définir ces temps.

Le temps réel de travail est la valeur du travail que peut exécuter un bon ouvrier ayant la qualification professionnelle requise pour son exécution, cette valeur étant exprimée en temps, les conditions d'organisation du poste étant celles qui sont définies à la page précédente. Ce temps est le résultat des mesures faites en analysant et en observant le travail, ces mesures ayant été majorées des coefficients d'effort physiologiques qui permettent à l'exécutant d'accomplir sans accumulation de fatigue sa journée normale de travail. Ces temps sont donnés en centièmes

d'heures, unité qui permet ensuite les additions sans que des transformations soient nécessaires au cours des calculs.

Mais il est évident que tout chantier ne pourra réaliser les conditions définies. C'est pourquoi il a été laissé une colonne en blanc, celle des temps tarifés, afin que le technicien puisse porter dans cette colonne les temps qui peuvent être réalisés effectivement dans l'entreprise considérée en fonction de son organisation. La différence entre les temps tarifés et les temps réels de travail donne immédiatement la mesure des améliorations à attendre d'une meilleure organisation.

Enfin le tableau est complété par l'indication du temps constant de malaxage.

\* \*

Le dossier-chantier est établi sur les mêmes principes que le précédent, appliqués aux moyens de transport et de manutention utilisés sur le chantier (bennes, wagonnets, voies).

Mais outre les tableaux des temps élémentaires codifiés, qui sont constants, les mouvements élémentaires correspon-

dant étant toujours identiques à eux-mêmes, il comprend des « tableaux de temps élémentaires » relatifs aux opérations qui dépendent de paramètres variables comme la longueur du trajet et le poids à manipuler, pour le transport d'une charge. La figure 4 donne, à titre d'exemple, le tableau relatif au transport par wagonnets à benne basculante. C'est un tableau à double entrée, les lignes correspondent à des distances échelonnées de 2 à 50 m, et les colonnes correspondent à des chargements divers (à vide, 300, 500, 750 l de béton).

### Application de dossier à la recherche d'une méthode de travail.

Ceci posé, nous allons voir comment ces renseignements peuvent être utilisés à l'organisation et à la préparation du travail sur le chantier.

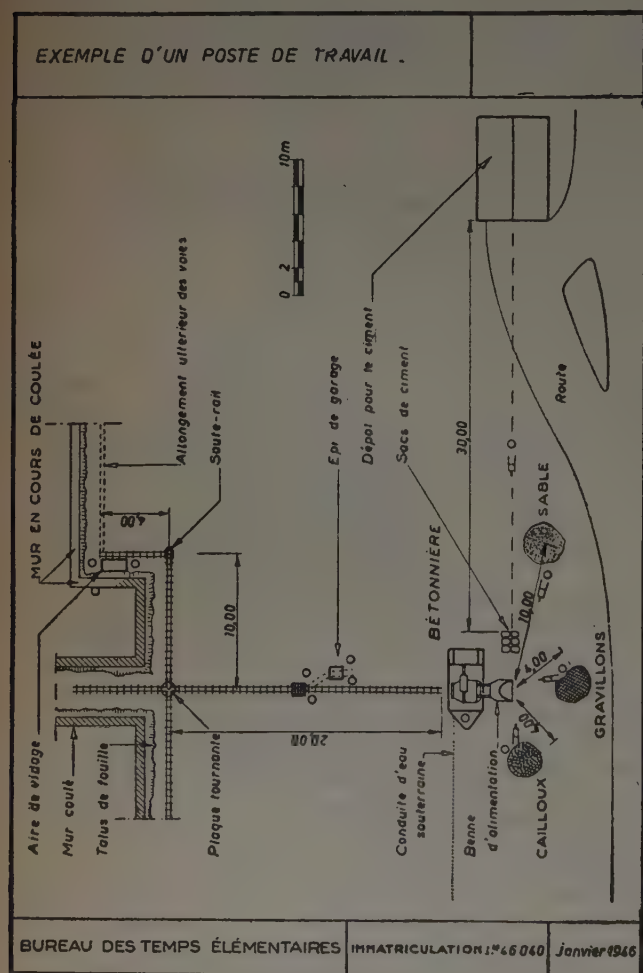


FIG. 5.

Les données du cas particulier étudié sont indiquées par la figure 5, sur laquelle figurent les emplacements respectifs de l'ouvrage en cours de coulée, de la bétonnière, et des différents dépôts de matières. Ces données ne sont d'ailleurs pas purement fictives; elles correspon-

dent dans l'ensemble à celles qui ont été réalisées lors des études qui ont servi à la constitution du dossier.

Nous commencerons, ainsi qu'il a été fait pratiquement, par l'observation de l'opération telle qu'elle se pratiquait avant toute tentative d'organisation. Par cette analyse, nous déterminerons quelles sont les causes qui limitent la production et imposent des temps morts aux opérateurs : c'est le « diagnostic ».

Sur cette base nous chercherons à réaliser une organisation supprimant ou diminuant ces temps morts par une « analyse ». Celle-ci nous conduira à étudier séparément l'alimentation et l'évacuation. Nous aboutirons ainsi à imaginer des modifications à apporter à l'organisation du poste et à la répartition des tâches et grâce à nos dossiers, nous pourrions chiffrer les augmentations de rendement qui en résulteraient. Nous serons ainsi à même de choisir la solution optimale, sans expérience et sans tâtonnement.

Mais ce n'est pas tout. Il ne s'agit pas là que d'une seule bétonnière. En généralisant la même méthode, nous verrons qu'elle est susceptible de conduire à des conclusions rationnelles sur l'organisation générale du chantier et l'ensemble de la conduite de la construction.

Les phases successives de l'étude sont représentées par les graphiques pages 8 et 9, dont la partie supérieure représente le travail tel qu'il a été observé initialement sur le chantier et la partie inférieure le travail tel qu'il doit s'exécuter après organisation rationnelle.

On constatera immédiatement que la deuxième méthode représente par rapport à la première un gain de 44 % sur le temps d'exécution et de 46 % sur la dépense de main-d'œuvre.

### 1° DIAGNOSTIC.

Nous avons observé sur un chantier le fonctionnement d'une bétonnière RICHIER type 36 C et étudié le travail des équipes d'alimentation et d'évacuation, dans les conditions géométriques définies sur la figure 5 Poste de travail. Ces résultats ont été portés sur les graphiques pages 8 et 9, et notés sous le n° 1 Mode de travail relevé sur un chantier.

Le cycle se décompose en trois parties principales :

A. Alimentation de la bétonnière en agrégats (représentés par les sept dernières lignes).

B. Évacuation du béton (représentée par la ligne supérieure).

C. La bétonnière elle-même, servant en quelque sorte de trait d'union entre les deux précédentes fonctions par l'intermédiaire d'une partie du tambour pour l'évacuation et, d'autre part, la benne de chargement liée à l'alimentation.

Nous remarquons que l'utilisation de la bétonnière et de l'équipe d'alimentation est freinée par l'évacuation du béton vers le lieu de coulée. En effet, les deux manœuvres qui roulent les wagonnets vers l'aire de vidage, puis reviennent à la bétonnière, sont saturés; par contre le reste de l'équipe est obligé d'attendre.

Il est donc évident qu'il faut accélérer l'évacuation, ce qui ne peut se faire que par l'accroissement du débit d'évacuation du béton puisque la distance de transport est imposée (voir fig. 5).

## QUESTIONS GÉNÉRALES

### 2° ANALYSE.

Nous avons été amenés à étudier la marche de la bétonnière décomposée en deux fonctions (benne et tambour) conditionnant le travail des équipes attachées à l'alimentation et à l'évacuation.

Connaissant pour un dosage donné le temps de malaxage dans le tambour et de chargement de la benne, nous avons pu en déduire le cycle minimum de fonctionnement de la bétonnière, c'est-à-dire le temps nécessaire pour effectuer une gâchée; dans l'exemple choisi, ce temps est 3,71 C. H. <sup>(1)</sup> (pour un malaxage 1,67 C. H.).

L'alimentation et l'évacuation seront donc agencées pour obtenir la coordination la plus parfaite, d'une part avec le fonctionnement de la benne, et de l'autre avec celui du tambour.

### 3° ÉTUDE DE L'ALIMENTATION.

Afin de réduire les temps morts des manœuvres, il est nécessaire de décomposer leurs cycles en mouvements élémentaires afin de pouvoir regrouper ceux-ci selon une méthode rationnelle. C'est le résultat qui a été consigné sous le n° 2 des graphiques pages 8 et 9.

Le dosage imposé se décompose comme suit :

Deux brouettes cailloux;

Une brouette gravillons;

Deux brouettes sable;

Un sac de ciment.

Le cycle de la bétonnière, établi sans temps morts (sauf si l'on compte le malaxage superflu de 0,22 C. H.), servant de cycle conducteur, nous avons recherché la meilleure utilisation des hommes.

Un homme charge, roule et vide une brouette de cailloux, puis vide le ciment.

Un second manœuvre charge, roule et vide une autre brouette de cailloux et arrange les agrégats dans la benne.

Un troisième charge une brouette de sable, puis va charger, rouler, et vider une brouette de gravillons.

Enfin le dernier manœuvre, charge, roule et vide une brouette de sable, revient chercher celle chargée par le précédent manœuvre, la roule et la vide.

L'approvisionnement en ciment entre le dépôt et la bétonnière est assuré par un manœuvre utilisé seulement quelques heures par jour pour la constitution du stock à côté de la bétonnière.

### 4° ÉTUDE DE L'ÉVACUATION.

Pour cette partie, nous avons été amenés à étudier la fonction « Roulage de wagonnets ». Ces temps de roulages divers ont été relevés et ils nous permettent de déterminer

le temps nécessaire des différents parcours, et inversement de connaître le trajet maximum qu'on peut effectuer dans un temps donné.

Calculons, dans l'exemple choisi, le cycle d'évacuation d'un wagonnet.

Le parcours se décompose comme suit :

20 m en ligne droite 1 plaque tournante;  
10 m en ligne droite 1 saute-rail;  
4 m en ligne droite.

Les temps nous sont fournis par les tableaux de temps élémentaires du dossier Chantier (voir fig. 3 et 4).

	DISTANCES	ALLER, wagonnet plein 300 l	RETOUR, wagonnet vide	TOTAL
Roulage	20 m	0,95	0,73	1,68
	10 m	0,50	0,36	0,86
	4 m	0,22	0,16	0,38
Pivotements	Pivotement du wagonnet plein (300 l) sur saute-rail .....			0,33
	Pivotement du wagonnet vide sur saute-rail .....			0,21
	Pivotement du wagonnet plein (300 l) sur plaque tournante .....			0,29
	Pivotement du wagonnet vide sur plaque tournante .....			0,16
Vidage du wagonnet plein (300 l) .....				1,30
TOTAL .....				5,21

Il convient d'ajouter à ce temps, les temps de mise en place et de remplissage du wagonnet qui nous seront donnés par le tableau des temps élémentaires codifiés du dossier Bétonnière (voir fig. 2).

Mettre en place et caler wagonnet sous bétonnière	(H 01)	0,36
Réceptionner et régaler béton dans wagonnet...	(L 05)	1,07
TOTAL .....		1,43

Le cycle d'évacuation du béton par un seul wagonnet est de :

$$5,21 + 1,43 = 6,64 \text{ C. H.}$$

Examinons le fonctionnement de la bétonnière dans de telles conditions. L'équipe se compose de :

1 conducteur de la bétonnière }  
4 manœuvres à l'alimentation } 7 hommes  
2 manœuvres à l'évacuation }  
1 manœuvre à l'approvisionnement en ciment,  
imputé pour 2,40 C. H. par cycle.

Le cycle d'évacuation étant le plus long commande tous les autres.

La dépense de main-d'œuvre pour une gâchée est alors de :

<sup>(1)</sup> C. H. centième d'heure.

$$(6,64 \times 7) + 2,40 = 48,88 \text{ C. H.}$$

En disposant un épi sur le circuit d'évacuation, nous pouvons assurer celle-ci par deux wagonnets.

Le cycle conducteur est alors le cycle de la bétonnière, soit 3,71 C. H. L'équipe compte deux hommes de plus, soit neuf hommes.

La dépense de main-d'œuvre par gâchée est de :

$$(9 \times 3,71) + 2,10 = 33,35 + 2,40 = 35,79 \text{ C. H.}$$

Ce procédé présente un double avantage :

1° Une économie de main-d'œuvre qui va aller s'accroissant. En effet, le dessin du poste de travail fait présager une extension des voies qui va se traduire par une meilleure utilisation des wagonnets, sans pour cela que s'allonge le cycle de fonctionnement de la bétonnière.

2° L'avancement plus rapide des travaux puisque l'équipe entière travaille au rythme de meilleure utilisation de la bétonnière.

Il est inutile de reprendre pour chaque cas particulier le calcul précédent. On peut déterminer quelle est la distance maximum qu'il est intéressant de desservir avec un seul wagonnet.

Évacuation par 1 seul wagonnet : Équipe de 7 hommes  
Évacuation par 2 wagonnets : Équipe de 9 hommes

L'évacuation par deux wagonnets permettant de se tenir dans le cycle conducteur de 3,71 C. H., la dépense de main-d'œuvre par gâchée est de :

$$3,71 \times 9 + 2,40 = 33,39 + 2,40 = 35,79$$

Pour obtenir une dépense au plus égale à 33,39 C. H. avec une équipe de sept hommes il faut que le cycle conducteur soit au plus égal à :

$$\frac{33,39}{7} = 4,77 \text{ C. H.}$$

Ce temps représente le cycle de fonctionnement de l'ensemble du poste de travail, en particulier celui de l'évacuation.

Déduction faite des temps de réception et de vidage du béton (soit 2,73 C. H.) ; il reste pour le roulage seul 2,04 C. H., temps qui équivalent à une longueur de voie de 25 m. C'est la longueur maximum à admettre pour une évacuation qui serait faite avec un seul wagonnet de 300 l.

Il est bien entendu que l'introduction sur le parcours de saute-rails, plaques tournantes, épis, etc., vient réduire cette distance. Comme nous l'avons montré il y a un instant, il n'est pas possible de traduire le temps de franchissement de ces accessoires en mètres de voie, ils sont donc exprimés en temps élémentaires codifiés.

Lorsque l'allongement des voies devient trop important, l'augmentation du nombre des wagonnets pour assurer le débit d'évacuation du béton devient prohibitif. En effet, outre l'installation des épis qui n'est pas toujours

possible, compte tenu des dispositions du chantier, l'équipe d'évacuation deviendrait trop conséquente.

On est donc conduit à envisager le déplacement de la bétonnière afin de l'installer dans une zone où elle sera appelée à fonctionner suffisamment longtemps pour que le temps de déplacement soit amorti.

Il est ainsi nécessaire de rechercher les « lieux géométriques » occupés par les bétonnières.

Partant de ces données nous avons réalisé le graphique n° 2 (p. 8 et 9).

Ce mode opératoire présente sur le précédent une économie de main-d'œuvre de 46 % et le temps d'exécution, c'est-à-dire l'immobilisation du matériel et du personnel est réduit de 44 %.

### Application du dossier à l'organisation générale du chantier.

Les observations et la méthode de travail définies ci-dessus ne sont pas que les résultats bruts d'une étude de temps.

Un tel dossier permet de plus d'organiser l'utilisation des bétonnières et des équipes d'ouvriers qui y sont attachés.

Étant donné les plans de l'ouvrage à réaliser et les dispositions générales du chantier, il est possible de déterminer rationnellement :

1° Le nombre optimum de bétonnières fixé par les conditions techniques ci-dessus, les délais exigés et l'importance de la main-d'œuvre mise en jeu.

2° Les emplacements, types de bétonnières définis par les distances maxima d'évacuation à admettre, distances au delà desquelles il est plus économique pour la coulée d'un volume donné de déplacer la bétonnière.

3° Le circuit des canalisations d'eau desservant les bétonnières sera établi en tenant compte des emplacements définis précédemment.

L'étude des trois points ci-dessus fixe le choix et l'importance du matériel de bétonnage (bétonnières, voies, wagonnets, canalisations d'eau et matériel annexe) absorbé par le chantier ainsi que la distribution de ce matériel sur le terrain.

Simultanément peut être prévu le déroulement des différents travaux de bétonnage. Cette organisation comportera :

1° L'agencement de chaque bétonnière prise individuellement : détermination du nombre de wagonnets suivant la longueur de roulage, coordination des cycles des manœuvres chargés de l'alimentation en agrégats et ciment. C'est cette étude qui a été exposée en détail dans le paragraphe « Application du dossier à la recherche d'une méthode de travail ».

2° La constitution des tas d'agrégats au voisinage des bétonnières, ce qui implique la présence de voies d'aménées pour camion desservant les emplacements types de bétonnières.

3° Les déplacements d'appareillage (bétonnières, voies, wagonnets). Selon l'avancement des travaux il est utile

de déterminer à partir de quel moment une bétonnière doit nécessairement être déplacée et à quel emplacement elle doit être affectée. L'ingénieur ou le technicien du chantier pourra donc établir, dans le cadre de l'organisation générale du chantier, le planning de roulement des postes « Bétonnières ».

4° La possibilité de déterminer, grâce au planning ci-dessus, les délais d'utilisation des bétonnières, c'est-à-dire la date d'amenée du matériel sur chantier et la date où ce matériel sera à nouveau disponible.

5° Enfin la possibilité également de déterminer le volume et le temps d'occupation de la main-d'œuvre nécessaire au chantier.

En un mot, nous pouvons par ce dossier, déterminer et contrôler l'utilisation du matériel et des ouvriers affectés au fonctionnement des bétonnières.

Signalons encore une fois la répercussion de l'emploi de tels documents sur l'utilisation du matériel, son volume, son amortissement, variables qui, elles aussi, ont une influence directe sur le prix de revient.

La création de tels dossiers pour toutes les activités permettra l'établissement d'un plan de travail général pour le chantier prévoyant l'ordonnement rationnel de tous les travaux. Ces documents s'avèrent alors comme les outils indispensables permettant de *prévoir*, donc de coordonner les diverses fonctions, c'est-à-dire d'*organiser*.

L'Ingénieur chargé des travaux, s'appuyant sur des données scientifiquement établies et non sur des connaissances empiriques acquises par expérience, mais toujours d'interprétation très large, sera à même d'éviter les contre-temps dispendieux.

Ayant en main « l'Étude de Fabrication » soigneusement établie, il lui sera possible d'exercer un contrôle efficace de la main-d'œuvre. L'ouvrier à qui l'on confiera des tâches bien déterminées, travaillera avec confiance si le gaspillage qu'il dénonce si souvent avec juste raison a disparu et s'il sent que sa tâche est rémunérée suivant le potentiel professionnel qu'elle exige tant au point de vue qualitatif que quantitatif et si cette rémunération équitablement établie lui permet ainsi qu'à sa famille de vivre en toute dignité.

### CONCLUSION

L'industrie française est tenue aujourd'hui de tendre tous ses efforts vers une augmentation de sa *productivité*, afin d'obtenir des prix de revient satisfaisants tant sur le marché intérieur que sur les marchés extérieurs.

Cet accroissement ne saurait être en aucun cas obtenu au détriment de la vie ou de la santé du travailleur. Bien plus, celui-ci doit pouvoir être dirigé vers des tâches d'un niveau tel qu'il y ait toujours une sollicitation de ses aptitudes psycho-physiologiques et professionnelles.

Il doit resté gravé dans l'esprit de tous ceux qui placent la vie de la France au-dessus de toute autre préoccupation qu'une activité en faillite, quel qu'en soit le volume, une technique cristallisée, des produits invendus ou invendables, un régime de travail sporadique, le chômage représentent autant de pertes sèches pour notre économie.

Or qui paye, en définition, ce qui est gaspillé, sinon le consommateur. Et nous sommes tous consommateurs.

L'organisation de la vie des hommes en société dépend avant tout de l'exploitation des richesses par le travail. C'est donc à l'augmentation de notre potentiel d'exploitation que nous devons nous appliquer d'abord.

Éviter toute perte de temps, afin d'augmenter le potentiel économique est le problème qui force aujourd'hui l'attention du monde entier, et particulièrement le nôtre : la seule raison pour laquelle notre pays n'est ni étonné, ni désespéré des pertes formidables qu'il subit chaque jour et qui peuvent être évaluées au bas mot à 40 ou 50 % de ses possibilités de production, c'est qu'il les ignore.

C'est cette tâche immense, mais vitale, résorber les pertes subies par l'économie française, que tous, patrons, ingénieurs, techniciens, ouvriers, nous devons faire nôtre si nous voulons que la France gagne la bataille de la Paix.

## DISCUSSION

**LE PRÉSIDENT.** — Je remercie vivement M. LAURU de son brillant exposé et de la documentation qu'il nous a fournie.

Je n'ignore pas que les chiffres d'économie qu'il a indiqués sur le fonctionnement d'un poste de bétonnage vont rencontrer un certain scepticisme chez les professionnels, et pourtant sur des points précis de telles économies ont pu être réalisées dans d'autres industries. Sans doute, sur un chantier, l'ensemble du problème est-il très complexe. M. LAURU a examiné un poste de travail isolé en régime continu; en fait, un tel poste fonctionne rarement plus de un jour ou deux de façon continue. Le bétonnage terminé il faut insérer au mieux la main-d'œuvre sur d'autres postes. L'absentéisme et les intempéries font d'ailleurs qu'on ne sait jamais très exactement ce qu'il sera possible d'entreprendre lorsqu'un premier travail sera terminé.

Il faudrait définir chaque jour les postes de travail pour le lendemain et même les revoir à l'ouverture du chantier en fonction du temps et des présences constatées. Un personnel de méthode très entraîné et nombreux serait nécessaire.

Est-ce à dire qu'il ne faille pas s'attaquer au problème ? Pour ma part, je ne le crois pas. Je pense que si le chantier échappe encore dans son ensemble à une organisation très poussée définissant exactement chaque tâche, des études telles que celles que M. LAURU nous a exposées peuvent être profitables et doivent permettre de repêcher dans les postes de travail habituels des temps morts (volontaires ou non) extrêmement importants.

L'exposé de M. LAURU sur la mise en ordre du poste bétonnage me fait également penser que les compressions de dépense qu'il a obtenues par un resserrement des temps de travail supposent que dans la pratique l'augmentation de la somme totale d'efforts à laquelle elles conduisent pour les ouvriers sera acceptée. Pour cela, il faudrait certainement qu'une partie tout au moins de l'économie bénéficie à la main-d'œuvre.

De toute façon la généralisation de l'étude du travail sur un chantier ne pourra avoir lieu que dans la mesure où le climat de stabilité, de continuité, que j'ai défini dans mon allocution sera créé.

Nous dirons dans d'autres communications comment il sera possible de créer ce climat de stabilité nécessaire à nos recherches d'organisation et à une mise au point des méthodes de travail.

Nous croyons à l'efficacité de la propagande. Il nous faut convaincre pour nous créer des disciples. Dans cette œuvre d'équipe qu'est le chantier, la négligence d'un seul peut tout compromettre. Il nous faut entraîner la conviction de tous les membres de l'équipe.

Nous croyons d'ailleurs davantage à la propagande par l'exemple qu'à la parole ou à l'écrit et nous comptons bien que des entreprises évoluées auront l'occasion prochaine de nous montrer le chemin sur des programmes que nous demanderons à des administrations de préparer spécialement. Il existe déjà des exemples vécus de réussites de chantiers organisés, nous les publierons.

Nous comptons donner également des exemples d'erreurs commises sur des chantiers par suite de changements ou de manque de préparation et chiffrer les heures de travail perdues.

Nous plaiderons enfin pour la refonte de cahiers des charges qui devront être repensés en fonction des exigences de la préparation du travail.

Parallèlement, nous comptons susciter avec le concours de spécialistes des recherches sur les postes de travail dans le bâtiment ainsi que sur la meilleure organisation intérieure des entreprises.

Je pense que conformément aux habitudes, certains d'entre nous désirent soit poser des questions au conférencier, soit exposer leur point de vue personnel. Je leur donnerai bien volontiers la parole.

**M. PEHUET.** — Je voudrais signaler que l'organisation du travail sur les chantiers est une question qui a préoccupé un certain nombre de personnes depuis quelques années. Déjà au Comité national de l'organisation française, il y a une école d'organisation scientifique du travail. Dans le cours général d'organisation il y a des séries particulières, dont l'une concerne spécialement le travail des chantiers.

Depuis 15 ans on enseigne dans cette école l'organisation du travail dans les entreprises du Bâtiment. Sur les chantiers ont été formés des techniciens qui pourraient vous apporter cette utile collaboration que vous demandiez tout à l'heure, et l'on pourrait ainsi réaliser une meilleure préparation du travail dans le Bâtiment.

**LE PRÉSIDENT.** — Nous vous remercions de votre intervention qui apporte de l'eau à notre moulin. Il faut donc faire une propagande, démontrer que ce travail de préparation et d'organisation se poursuit depuis 20 ans dans nos groupements, et cependant il y a encore beaucoup de gens qui nous ignorent. Il faut le répéter partout, le publier dans la presse.

Ce problème nous l'abordons d'ailleurs avec beaucoup d'humilité. Nous ne nous posons pas en spécialistes de la question, mais en industriels préoccupés de lui apporter une solution.

J'aurais voulu qu'un certain nombre de nos confrères nous posent des questions au sujet de la conférence de M. LAURU; mais nous vous signalons que nous nous tenons à votre entière disposition, et qu'il existe, 28, boulevard Raspail, un *Institut Technique* qui s'occupe spécialement de cette question de la préparation du travail. Nous serions très heureux d'y être consultés par des professionnels qui nous diraient : « La question que vous traitez nous intéresse, renseignez-nous » ou encore : « Voici le problème qui me préoccupe. » Nous vous demandons de nous faciliter notre tâche, plus nous serons nombreux à nous intéresser à la question, plus notre travail pourra donner des résultats féconds.

# ANNALES DE L'INSTITUT TECHNIQUE DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS

28, BOULEVARD RASPAIL, PARIS-VII<sup>e</sup>

Juin 1948

N° 31

Nouvelle série.

## QUESTIONS GÉNÉRALES, N° 5

---

CENTRE D'ÉTUDES SUPÉRIEURES

EXPOSÉ DU 24 MAI 1948

SOUS LE PATRONAGE DE

MONSIEUR LE MINISTRE DE LA RECONSTRUCTION ET DE L'URBANISME

---

# LE CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT

Par **M. André MARINI,**

Directeur du Centre.

INTRODUCTION DE

**M. MERVEILLEUX DU VIGNAUX,**

Conseiller Référendaire à la Cour des Comptes,

Directeur du Cabinet de M. le Ministre de la Reconstruction et de l'Urbanisme.

INSTITUT TECHNIQUE DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS

## INTRODUCTION DE M. MERVEILLEUX DU VIGNAUX

Permettez-moi, Mesdames et Messieurs, de remercier tout d'abord l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, dont nous sommes aujourd'hui les hôtes, d'avoir organisé cette réunion et de nous avoir conviés à entendre l'exposé de M. MARINI. Son initiative va nous permettre, en quelque sorte, de consacrer officiellement la naissance du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment.

Je dois aussi rendre hommage à la ténacité, à l'ardeur, à la foi de M. MARINI qui a triomphé de tous les préjugés et de tous les obstacles. Le Centre Scientifique et Technique est bien son œuvre. Au moment où il quitte les cadres du Ministère, je suis heureux de lui dire que le regret que nous en éprouvons s'accompagne de la certitude qu'il restera l'un des hommes auxquels le pays devra sa reconstruction.

Si le Ministre de la Reconstruction et de l'Urbanisme m'a prié de l'excuser et de le représenter à cette tribune, c'est qu'il y a ici plus qu'un symbole, plus qu'un geste de présentation au début d'une conférence : le Ministre est heureux de marquer tout l'intérêt qu'il attache à une telle réalisation. Voici un service d'État, le Service Technique de la Construction Immobilière qui a fait partie intégrante de la Direction des Travaux, de la Direction de l'Urbanisme, de la Direction des Programmes du Ministère de la Reconstruction, voici un Service administratif qui devient un organisme privé non pas du fait du hasard et des circonstances, mais de par la volonté du Gouvernement. Le fait est, je crois, assez rare pour être souligné. Ce détachement voulu par M. LETOURNEAU, poursuivi et réalisé par M. CORY, est le signe que l'Administration, dans sa continuité, est moins jalouse qu'on le dit parfois de maintenir et de développer son intervention directe. Il ne s'agit nullement ici de prendre parti dans la querelle traditionnelle qui oppose les Libéraux aux Dirigistes. D'un point de vue pragmatique, il s'agit seulement de reconnaître que l'État

n'a point le monopole du sens de l'intérêt général, et d'en tirer les conséquences. Le Ministre a affirmé à maintes reprises que la Reconstruction serait l'œuvre des sinistrés eux-mêmes, et de son côté le Parlement ne manque jamais l'occasion d'établir ou de rétablir le libre jeu de l'initiative privée. Ceux d'entre vous qui ont suivi les débats relatifs au projet de loi sur les Coopératives et les Associations syndicales de reconstruction, ont pu constater cette tendance et cette évolution. Autant les Français se méfient de l'autoritarisme, autant ils sont disposés je ne dirai pas seulement à accepter, mais encore à solliciter les conseils des Techniciens dont ils connaissent la compétence. Je suis sûr, pour ma part, que l'influence d'un organisme que dirigent des hommes comme M. le Président Armand GUILLON, comme M. MARINI et M. Edmond BILLIARD, sera d'autant plus grande et d'autant plus bienfaisante, qu'elle résultera d'une libre acceptation et non point d'une contrainte. Sans révéler aucun secret, je crois pouvoir affirmer que cette influence bienfaisante s'exerce déjà pour le plus grand profit de l'État et des particuliers. Au sein de ce Centre Scientifique et Technique, s'établit en effet cette action concertée, inspirée du double souci d'utiliser au mieux nos ressources, encore trop faibles, en matériaux, comme en main-d'œuvre spécialisée, et de mettre en œuvre les procédés techniques modernes de construction.

Tout doit concourir à cette nécessité de comprimer au maximum l'effort financier demandé à la Nation. Tel est notre dessein, tel est aussi au premier chef, le vôtre. Nous y travaillerons ensemble.

Au nom du Ministre, je vous en remercie, et je donne la parole à M. MARINI, Directeur du Centre Scientifique et Technique, qui va nous exposer comment il entend mettre au Service des Entreprises, des Architectes et des Travailleurs du Bâtiment, l'instrument sur lequel nous comptons tous pour assurer le succès de la tâche immense qui nous incombe.

## EXPOSÉ DE M. MARINI

Au moment où le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment engage son action, je suis heureux de pouvoir présenter au public de l'Institut Technique une brève étude sur les buts que nous nous sommes assignés, sur la nature juridique de notre établissement, sur les circonstances qui ont motivé sa création, sur sa structure et sur son programme. Profitant de cette occasion favorable que je remercie M. le Président BILLARD, M. LEBELLE et M. GUÉRIN de m'avoir si aimablement offerte, je ferai en même temps un rapide bilan des efforts qui ont été accomplis et des résultats qui ont été atteints par le Service Technique de la Construction Immobilière, qui existait au Ministère de la Reconstruction et de l'Urbanisme, et dont la nouvelle Fondation reprend les attributions essentielles, en bénéficiant de bien meilleures conditions, à notre avis, pour remplir sa très lourde et très importante mission.

\* \* \*

Nous ne croyons pas qu'il soit utile de rappeler longuement, après tant d'excellents exposés, les causes impérieuses qui doivent amener une évolution profonde des industries du bâtiment, appelées à faire face à d'immenses programmes immobiliers.

L'ampleur de la tâche, la pénurie des matériaux, l'insuffisance de main-d'œuvre spécialisée, la nécessité de comprimer au maximum l'effort financier demandé à la nation, l'influence aussi de grands pays étrangers, d'où nous viendront non seulement des matériels nouveaux mais aussi des techniques nouvelles, tout cela crée inévitablement, qu'on le veuille ou non, un ensemble de facteurs déterminants, auxquels n'étaient pas habituées ces industries, dont le caractère traditionnel a été bien souvent décrit.

Nous n'ignorons pas les réticences et le scepticisme d'une fraction encore notable des professionnels du bâtiment, qu'il s'agisse d'architectes, d'entrepreneurs, de techniciens des cadres. Mais

nous savons bien que les illusions tomberont, que la situation apparaîtra sous son véritable jour, à l'épreuve des premiers programmes de construction réellement importants. L'obligation de moderniser et de rationaliser les activités du bâtiment apparaîtra alors aux yeux des plus incrédules, et les maîtres d'œuvre comme les professionnels devront bien s'adapter à des conditions économiques profondément différentes de celles que nous connaissions, dans le même domaine, avant la guerre.

Nul ne peut douter qu'il convienne de se préparer à cette nécessaire évolution. Nous devons la favoriser et l'orienter dans le sens le plus conforme à l'intérêt national.

Ce n'est que par l'étude et par la recherche, dirigées vers des buts résolument pratiques, que le bâtiment pourra progressivement accéder à cet état de véritable industrialisation dont il est encore éloigné.

Des tentatives ont déjà été entreprises, — fort heureusement, — qu'elles soient dues à l'initiative d'organisations professionnelles, de techniciens privés ou de services publics. Elles apparaissent fort intéressantes et fort méritoires, elles doivent être poursuivies, mais elles sont accomplies avec des moyens souvent insuffisants et elles présentent le grave défaut d'être peu coordonnées entre elles, de n'être point axées sur des objectifs communs.

La *Commission de Modernisation du Bâtiment et des Travaux Publics*, qui siège auprès du *Commissariat Général au Plan*, après avoir effectué un examen très général et très complet du vaste problème qui lui était soumis, a effectivement considéré que les résultats qu'elle souhaitait (augmentation de la productivité et abaissement des prix de revient) ne pourraient être obtenus que par l'action d'un nouvel organisme, capable d'animer, d'orienter et d'aider les études et les recherches qu'effectuent les laboratoires et les services publics et privés.

Conformément à cet avis, le *Conseil du Plan* a adopté le 7 janvier 1947 les résolutions suivantes :

« ... Le Conseil du Plan demande au Gouvernement :

« D'envisager la création d'un Conseil Central des Travaux pour coordonner les travaux des administrations publiques et des entreprises nationalisées;

« D'assurer la création, sous la forme d'un Centre Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, d'un organisme de recherche, d'information, de documentation et de diffusion, s'étendant à l'ensemble des activités de la construction. »

Ces résolutions ont été retenues par le *Conseil des Ministres* qui a approuvé l'ensemble du Plan le 14 janvier 1947.

Avant d'aller plus loin, on notera que la *Commission de Modernisation* n'avait pas dissocié le cas des Travaux Publics de celui du Bâtiment. Cette position était, à première vue, logique, conforme du reste à la double mission dont la Commission était investie.

On dut cependant constater, au cours des délibérations qui suivirent cette décision de principe, que malgré les avantages qu'aurait présentés ce groupement, il se heurtait à des difficultés nombreuses et qu'il ne s'imposait pas absolument. Sans doute aurait-il inutilement alourdi l'organisme projeté, alors que les problèmes à traiter étaient en général différents, les Travaux Publics étant dans une situation plus évoluée, plus industrialisée, que le Bâtiment, réunion complexe et plus difficilement organisable de corps d'états nombreux.

Il fut donc convenu que, dans l'application des résolutions du *Conseil du Plan* on s'en tiendrait jusqu'à nouvel ordre à la création d'un établissement limité aux activités du Bâtiment.

Certains principes se dégagèrent par ailleurs des débats de la Commission et il paraît intéressant d'évoquer cette phase des pourparlers préliminaires, qui conduisirent en définitive à la constitution du *Centre Scientifique et Technique du Bâtiment*; elle explique en effet le choix de la catégorie juridique à laquelle nous eûmes recours et les caractères de l'établissement que nous pûmes fonder.

Les parties en présence étaient, d'une part, l'État, en la personne de délégués des services publics les plus directement intéressés, d'autre part, la profession, avec les organisations les plus représentatives des architectes, des entrepreneurs, des travailleurs du bâtiment.

Un accord unanime se fit sur les propositions générales suivantes, auxquelles il convient de se reporter pour bien comprendre la nature et la mission du Centre qui vient d'être créé :

1° Sans être un établissement public, l'organisme technique, visé dans les résolutions du 7 janvier 1947, doit avoir une autorité morale suffisante pour pouvoir établir un programme national de recherches, conçu d'une manière assez large et assez souple pour que soient définis les buts à proposer sans porter atteinte à la personnalité et à l'indépendance des chercheurs.

2° Il doit permettre d'établir une coordination, sur le plan technique, non seulement des centres d'études et de recherches, déjà existants, mais aussi des services publics, des sociétés nationalisées, des groupes d'industries, des groupements de sinistrés, des offices et des sociétés d'habitations à bon marché, et d'une manière générale, des grands maîtres d'œuvre, qui ont d'importants programmes de construction à réaliser, ou qui s'intéressent par la nature de leur mission, à l'évolution des industries du bâtiment.

3° Il ne doit pas se substituer toutefois aux centres et aux laboratoires existants, ni les absorber, mais respectant leur autonomie, guider avec leur consentement les efforts qu'ils déploient, les aider à développer leur action dans les secteurs où la nécessité en apparaît, et aussi créer les centres et les laboratoires dont l'absence actuelle est ressentie par les techniciens du bâtiment.

4° Il doit décharger les services publics, en particulier ceux du *Ministère de la Reconstruction et de l'Urbanisme*, de certaines tâches scientifiques et techniques qui ne sont pas à la vérité dans les attributions normales de l'Administration (telles que la codification technique, l'examen des procédés et des matériaux nouveaux, l'organisation de la recherche, etc.); il les accomplira dans de meilleures conditions, grâce à l'indépendance de sa position et à sa continuité de vues, grâce aussi au fait que l'établissement agira en vertu de l'accord réalisé entre patrons, travailleurs, architectes, bénéficiant par conséquent de l'appui de leurs organisations et de la collaboration des organismes techniques qu'elles ont créés; d'autre part, sa situation autonome doit lui permettre de devenir — sans qu'il y ait d'obligation légale — le conseiller non seulement des services techniques spécialisés, mais aussi des grands maîtres d'œuvre qui manquent souvent, pour la réalisation de leurs programmes, de documentation valable et d'avis autorisés.

\* \* \*

Ces conclusions de la *Commission de Modernisation* ont été adoptées sans réserves par M. LETOURNEAU, alors Ministre de la Reconstruction et de l'Urbanisme et par M. Jean MONNET, Commissaire Géné-

ral au Plan. L'adhésion à notre projet de ces deux éminentes personnalités et des administrations qui étaient sous leur haute autorité constitua, sans nul doute, l'appui initial qui nous était indispensable, et nous permit de construire effectivement l'organisation dont la *Commission de Modernisation* avait posé les premières bases.

Nous ne rencontrâmes pas moins d'audience auprès des autres départements ministériels, dont la compréhension se manifesta sans retard et de la plus heureuse façon.

Ces appuis ne devaient point se démentir, et M. CORY, notre actuel Ministre de la Reconstruction, nous a donné aujourd'hui même un précieux témoignage de la bienveillante attention qu'il accorde à l'œuvre que nous avons entreprise, en déléguant à cette conférence M. MERVEILLEUX DU VIGNAUX, Conseiller Référendaire à la Cour des Comptes, Directeur de son Cabinet. Qu'il me soit permis d'adresser à M. MERVEILLEUX DU VIGNAUX, mes très sincères remerciements pour les paroles aimables qu'il vient de prononcer à notre égard avec l'autorité qui s'attache à sa personne et à ses fonctions. Nous avons été particulièrement sensibles à cette nouvelle preuve de la sollicitude des pouvoirs publics.

Ce fut donc dans un climat particulièrement favorable que put être établi, après les négociations dont nous venons de parler, par les soins du Ministère de la Reconstruction, avec l'accord du Commissariat Général au Plan, un projet de Fondation, qui, sous sa forme définitive, fut soumis à nouveau à la *Commission de Modernisation du Bâtiment et des Travaux Publics*.

Celle-ci, sur la proposition de son Président, M. ARRACHARD, nous donna son approbation unanime dans sa séance du 11 juillet 1947.

Les Fondateurs du nouvel établissement furent les personnalités suivantes :

— Le Ministre de la Reconstruction et de l'Urbanisme;

— Le Commissaire Général au Plan;

— Le Président du Conseil Supérieur de l'Ordre des Architectes;

— Le Président de la Fédération Nationale du Bâtiment et des Activités Annexes;

— Le Secrétaire Général de la Fédération Nationale des Travailleurs du Bâtiment et du Bois.

La dotation statutaire (fonds de réserve initial) a été composée de versements faits d'une part par l'État, d'autre part par les trois grandes organisations professionnelles signataires de l'acte de fondation.

La Fondation est ensuite alimentée par les subventions qui lui viennent non seulement du Ministère de la Reconstruction et de l'Urbanisme, mais aussi de tous les organismes qui, reconnaissant son utilité, acceptent de soutenir son activité.

Il s'agit donc d'un établissement financé par subventions publiques et privées et recevant aussi le prix normal des travaux qui lui sont demandés. Son premier budget annuel s'élève à environ 150 millions.

Dénommée « Centre Scientifique et Technique du Bâtiment », la Fondation a été reconnue d'utilité publique par décret du 17 décembre 1947.

Elle est administrée par un Conseil d'Administration où sont représentés non seulement les services publics et les organisations professionnelles, qui ont signé l'acte de fondation, mais également le *Centre National de la Recherche Scientifique* et le *Ministère de l'Industrie et du Commerce*.

A ces représentants viennent s'adjoindre quatre personnalités choisies pour leurs titres et leur compétence.

Sur quatorze membres, le Conseil comprend dans ces conditions, cinq représentants des administrations publiques, cinq représentants des milieux professionnels, et quatre personnalités, désignées par cooptation à titre privé.

Le Président élu est M. Armand GUILLON, Conseiller d'État, ancien Résident Général en Tunisie, assisté de deux Vice-Présidents : M. Édmond BILLIARD, Président de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, et M. ARRACHARD, Secrétaire Général de la Fédération Nationale des Travailleurs du Bâtiment et du Bois.

Le Conseil désigne un Directeur, dont la nomination est soumise à l'approbation du Ministre de la Reconstruction, et qui reçoit une délégation de pouvoirs dans des limites prévues par les statuts.

\*\*\*

Il ne m'est pas possible dans le cadre de cet exposé sommaire de commenter plus longuement le texte des statuts. Mais sans doute est-il utile d'en lire l'article essentiel, celui qui est consacré au but de la Fondation. Rédigé d'une façon volontairement large, il indique ce que seront les principales orientations des travaux de notre Centre, sans pouvoir constituer un véritable programme.

Il ne saurait en effet être question d'entreprendre immédiatement, avec des moyens égaux à l'ampleur des tâches qui s'y trouvent évoquées, les activités de tous ordres qu'énumèrent les statuts. C'est précisément dans l'établissement de notre programme

d'action, dont je dirai quelques mots, que nous nous efforçons de concilier, en concentrant nos efforts, nos responsabilités statutaires et nos possibilités réelles.

Il n'en est pas moins vrai que l'article que je vais vous lire définit le mandat reçu de nos fondateurs, et qu'il est donc l'élément essentiel de la charte sur laquelle vit notre établissement :

La Fondation a pour but, en application de la résolution unanime de la Commission de Modernisation du Bâtiment et des Travaux Publics, adoptée le 11 juillet 1947 :

— De stimuler et d'aider le progrès et la diffusion en France, dans l'Union Française et à l'Étranger, des connaissances scientifiques et techniques concernant la construction immobilière;

— D'établir un programme national d'études et de recherches relatives au bâtiment et d'en faciliter l'exécution dans l'intérêt de la nation;

— De recenser, de réunir éventuellement et de diffuser toute documentation sur ces sujets;

— De coordonner, de développer l'activité des organismes et des laboratoires existants, et même de créer les organismes nouveaux qui apparaîtraient nécessaires en matière de recherches, d'études, de contrôle technique, de formation des techniciens dans le domaine de la construction immobilière;

— De permettre une coordination, sur le plan technique, des administrations publiques, sociétés nationalisées et groupes d'industries qui ont d'importants programmes de construction à réaliser ou qui s'intéressent, par la nature de leur mission, à l'évolution du Bâtiment.

\* \* \*

Pour quelles raisons n'a-t-il pas paru nécessaire ni même opportun de créer le Centre Scientifique et Technique par une loi ?

Deux raisons primordiales peuvent en être présentées :

1<sup>o</sup> Le principe même de la création de ce Centre a été précisément d'attendre de l'accord amiable intervenu entre les signataires de l'acte de fondation une efficacité dans la collaboration qui paraissait essentielle. Il a donc semblé inutile et inopportun de faire appel à des obligations légales. Le caractère d'établissement privé mais reconnu d'utilité publique correspond exactement aux désirs des membres de la Commission de Modernisation et à la volonté commune des Fondateurs.

2<sup>o</sup> La formule adoptée est dans la pratique plus souple et plus commode. Elle donne au Centre toutes les possibilités de fonctionnement d'un orga-

nisme privé. Les entraves administratives sont réduites au minimum, tout en laissant à l'État les droits d'intervention et de contrôle qui sont à la fois inévitables et nécessaires.

On se trouve donc en présence d'un Établissement qu'on pourrait qualifier de « semi-public », dans lequel sont représentés sur le même plan les intérêts de l'État et ceux de la profession.

Nous croyons profondément au succès d'une telle organisation qui, à égale distance d'un dirigisme absolu des recherches et d'un libéralisme total, introduit la notion, à nos yeux fondamentale, d'une politique technique « concertée ».

\* \* \*

Pour accentuer ce caractère d'organe de synthèse et de collaboration, le Conseil d'Administration et le Directeur du Centre sont assistés d'une Commission Consultative, dénommée *Comité National du Bâtiment*.

Le Conseil lui-même, qui a essentiellement des responsabilités de gestion et qui ne peut donc être trop étoffé s'il doit les assumer de manière effective, ne peut comprendre systématiquement tous les représentants d'organismes et de groupements qui sont légitimement intéressés par l'évolution technique de la construction immobilière; il ne peut davantage s'adjoindre toutes les éminentes personnalités, des milieux scientifiques et techniques, qu'il convient cependant, de toute évidence, d'associer aux travaux du Centre.

C'est par la voie du Comité National du Bâtiment que pourra être opérée cette large représentation, qui nous paraît indispensable.

Le Comité National ne se compose pas d'une seule commission. Il se divise, et nul ne s'en étonnera, connaissant la complexité et la diversité des problèmes du bâtiment, en sections spécialisées, que nous constituons progressivement, et qui seront finalement surmontées par une commission supérieure.

Cet édifice de commissions et de groupes techniques consultatifs est analogue au *Scientific Advisory Committee* créé pour le même but par le Gouvernement anglais.

Il doit remplir ce rôle fondamental de coordination technique dont l'importance est apparue à la Commission de Modernisation. Ses avis sur les programmes généraux d'études et de recherches seront communiqués au Conseil d'Administration.

La Présidence du Comité National du Bâtiment a été confiée par le Conseil d'Administration à M. Auguste PERRET, Membre de l'Institut, Président du Conseil Supérieur de l'Ordre des Archi-

tectes. La haute expérience de ce grand constructeur, les titres qu'il a acquis à notre admiration par l'œuvre considérable dont il a enrichi notre architecture, le désignaient tout naturellement pour ce poste éminent, que nous lui sommes reconnaissants d'avoir bien voulu accepter.

Le Directeur du Centre remplit auprès de lui les fonctions de Délégué Général du Comité National afin d'affirmer les liens organiques qui unissent le Comité à notre Fondation.

\* \* \*

Au moment où le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment prend la mission, très vaste et très importante, qu'il doit statutairement assumer, il est sans doute utile de tracer un rapide bilan des résultats obtenus par le Service Technique du Ministère de la Reconstruction, auquel il succède dans une très large mesure.

Ce Service, appelé autrefois Service des Études de la Construction, a orienté ses travaux, suivant les nécessités qu'imposait le fonctionnement même du Ministère, dans plusieurs directions que nous devons rappeler.

Il a d'abord établi des normes d'espace et d'équipement qui ont guidé les architectes des immeubles d'État, dans l'élaboration de leurs projets. Ces normes sont contenues dans une brochure intitulée *Premières directives en matière d'habitat urbain et rural*. Elles ont été parfois discutées. Il semble cependant qu'elles constituent encore, sous réserve de quelques adaptations et d'une interprétation assouplie, un ensemble de règles toujours valables dans la généralité des cas. On doit noter qu'elles ont exercé une certaine influence sur les constructeurs, même hors du Ministère. Le Service des H. B. M. les a prises comme bases de ses propres instructions. La S. N. C. F., dans beaucoup de chantiers, paraît pratiquement les avoir adoptées. Beaucoup de pré-fabricants, de leur côté, en ont largement tenu compte.

Il est toutefois incontestable qu'il ne peut être question de les considérer comme intangibles. Elles doivent faire l'objet de révisions périodiques, tenant compte des expériences acquises, des progrès que l'on fait dans la connaissance de cette jeune technique de l'habitat, et aussi des conditions économiques et sociales, qui évoluent avec le temps. Mais, telles qu'elles sont, elles restent utiles, et même représentent, par rapport à certains règlements encore en vigueur, une très nette amélioration.

Le Service, s'étant efforcé de contenir les programmes des architectes dans des limites aussi rationnelles et aussi sages que possible, a considéré

qu'il convenait de préparer les constructeurs aux solutions industrialisées vers lesquelles doivent s'orienter les entreprises du bâtiment, en effectuant une mise en ordre générale des connaissances techniques, en apportant une large contribution aux travaux de normalisation, en élaborant les documents de codification qui s'avéraient indispensables, en dégagant pour certains éléments des règles de standardisation.

C'est dans le cadre de cette tâche si complexe et si étendue, que fut décidée la rédaction d'un ouvrage, maintenant imposant par son volume, intitulé à l'origine : *Recueil des Eléments et Ensembles Fabriqués du Bâtiment* (soit : R. E. E. F.), qui se transforma peu à peu en un véritable Code technique de la Construction. Si cet ouvrage n'est pas encore complètement terminé, il n'en constitue pas moins un excellent instrument de travail, qu'ont appris à connaître beaucoup d'architectes et de techniciens.

Dans la même ligne de préoccupations, le Service se proposa de faire naître des règlements de calcul mieux adaptés aux conditions de la construction immobilière et aux récentes acquisitions de la technique que les règlements généraux, établis pour les ouvrages d'art, qui étaient jusqu'ici en vigueur. C'est ainsi que fut confié à des commissions, qui furent admirablement présidées par M. CAQUOT, Membre de l'Institut, le soin de rédiger un règlement du béton armé, un règlement des constructions métalliques et un règlement sur les surcharges dues à la neige et au vent. Grâce à l'active et précieuse collaboration de l'*Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics* ces nouveaux règlements furent mis au point et publiés; ils sont actuellement utilisés par la plupart des bureaux d'études.

Parallèlement à cet effort de codification, dont beaucoup de techniciens commencent seulement à comprendre la portée, et en liaison étroite avec lui, fut instituée une procédure d'examen et d'agrément des procédés et des matériaux nouveaux. L'abondance souvent excessive des innovations présentées conduisit en effet le Ministère de la Reconstruction à penser qu'il convenait, sous peine de graves mécomptes, de garantir les sinistres contre certaines illusions ou certaines erreurs, et qu'il y avait également lieu de suivre, dès son origine, l'évolution dont témoignait l'apparition de ces techniques non traditionnelles.

De nombreux dossiers furent examinés, donnèrent lieu à quantité de corrections, furent sanctionnés par des décisions provisoires, permettant des applications dont les résultats peuvent être suivis.

La procédure d'agrément a pris maintenant toute sa signification. Elle ne peut plus être seulement

considérée comme une formalité indispensable pour les travaux qui dépendent du Ministère de la Reconstruction; elle constitue une garantie technique que la plupart des maîtres d'œuvre exigent, et que les constructeurs eux-mêmes recherchent, car elle représente à la fois une vérification et une référence.

En même temps qu'étaient effectués ces examens, un champ de réalisations expérimentales était ouvert aux techniciens. A Noisy-le-Sec, une cité de nouvelles maisons individuelles fut progressivement édifiée : elle a rassemblé de nombreux types de constructions non traditionnelles, et elle a permis de très intéressantes expériences et de fructueuses confrontations. Cette cité fut souvent une école, particulièrement utile, pour les constructeurs comme pour les ingénieurs qui en ont suivi, en observateurs, les travaux.

Par ailleurs, sans parler des chantiers d'Orléans, dont les procédés spéciaux ont été choisis à la suite d'un concours technique déjà ancien, qu'avait organisé le Service des Études de la Construction, furent ouverts plusieurs chantiers d'essai, d'une cinquantaine de logements, pour l'expérimentation, à l'échelle semi-industrielle, des procédés déjà retenus, pour lesquels des prototypes satisfaisants avaient été réalisés. Ainsi l'observation peut-elle atteindre cet élément primordial qu'est le prix de revient. Un bureau spécial, grâce au contrôle des dépenses de salaires et de matériaux a effectivement été créé pour évaluer ces prix.

Cette campagne d'essais, sur prototypes et sur groupes de logements, n'est pas terminée. Elle a déjà donné de premières indications, et nous en tirerons sans aucun doute des résultats intéressants, que nous aurons, bien entendu, l'occasion de présenter par des articles ou des conférences.

Le public technique trouvera aussi, dans nos premières publications, le compte rendu des études et des recherches qui ont été poussées en diverses directions par le Service Technique de la Construction Immobilière et continuées par notre Fondation. On lira entre autres choses, très prochainement, quelques exposés concernant des recherches sur les pierres et sur certaines questions du domaine thermique.

\* \*

Conformément aux principes mêmes qui furent posés lors des négociations qui aboutirent à la fondation du Centre Scientifique et Technique, le Ministère de la Reconstruction et de l'Urbanisme décida d'abandonner la charge qu'il assumait jusqu'alors directement, en matière d'études générales, de liaison avec les organismes de recherche, de codification et de documentation techniques, d'agrément des procédés et des matériaux nouveaux, pour

la confier à l'établissement autonome, qu'il avait contribué à créer. Le Service Technique dont nous avons évoqué très sommairement l'œuvre qu'il réalisa fut donc supprimé et un protocole définissant les missions que le Ministère demande au Centre de remplir pour son compte fut signé le 8 avril 1948 par M. René CORTY et par M. Armand GUILLON. Nous reproduisons les principaux passages de cet acte, qui détermine certaines attributions du Centre et lui donne en même temps un rôle général de conseiller technique en matière de reconstruction :

*Article premier.*

La Fondation s'engage à donner au Ministre de la Reconstruction et de l'Urbanisme tous avis techniques qui lui seraient demandés dans le cadre de ses attributions statutaires.

*Article 2.*

La Fondation s'engage à faire pour le compte du Ministre de la Reconstruction et de l'Urbanisme, les études générales, les travaux de recherche et de documentation qui étaient antérieurement accomplis par les bureaux suivants du Service Technique de la Construction Immobilière (ou Service des Études de la Construction) :

- Bureau de la liaison avec les organismes de recherche;
- Bureau de la codification technique;
- Bureau des procédés et matériaux nouveaux.

*Article 3.*

La préparation, l'établissement, la publication, la diffusion des documents techniques de codification et d'information, qui incombait au Service Technique nommé au précédent article, seront effectués par la Fondation. Ces documents visent la normalisation, la standardisation, les prescriptions et clauses techniques générales, les règles de calcul, les conditions fonctionnelles et d'habitabilité.

La Fondation s'engage à constituer, pour suivre l'orientation de ces travaux, une commission d'examen des documents dont la composition sera soumise à l'approbation du Ministre de la Reconstruction et de l'Urbanisme.

*Article 4.*

La Fondation prononce l'agrément, provisoire ou définitif, total ou partiel, des procédés et des matériaux non traditionnels, sur l'avis d'une commission dont la composition sera soumise à l'approbation du Ministre de la Reconstruction et de l'Urbanisme. Celui-ci décide de ne plus délivrer de son côté de tels agréments, et de se référer, pour ce qui le concerne, aux agréments prononcés par la Fondation.

*Article 5.*

La Fondation donne au Ministre de la Reconstruction et de l'Urbanisme un avis technique sur les projets de réalisations ayant un caractère expérimental (prototypes, chantiers d'essai, etc.) sur production d'un dossier technique suffisant pour que puisse être apprécié l'intérêt de l'essai.

Elle suit les travaux d'exécution des prototypes, a toutes facilités pour examiner les autres réalisations expérimentales, et opère les études et les essais concernant ces réalisations.

Elle reçoit à leur sujet communication des pièces de contrôle établies en dehors d'elle, et présente un rapport motivé sur les résultats obtenus.

*Article 6.*

Le Ministre de la Reconstruction et de l'Urbanisme peut également demander à la Fondation de donner un avis technique sur les projets de construction immobilière concernant des programmes importants lorsque ces projets prévoient l'utilisation de procédés de construction ou de matériaux non traditionnels.

*Article 7.*

La Fondation accepte de participer — si la demande lui en est faite — en qualité d'expert gouvernemental, aux conférences internationales intéressant les techniques du bâtiment.

Nous croyons que ce protocole, tout récent encore au moment où nous écrivons ces lignes, sera suivi d'autres conventions analogues, qui seront les instruments d'une politique d'unification progressive, faite par les seuls moyens de la persuasion. Nous sommes convaincus que l'adoption par tous les grands maîtres d'œuvre de cahiers des charges uniques, d'une codification technique réellement nationale, d'une standardisation générale, d'un agrément partout obligatoire pour les procédés et les matériaux nouveaux, rendra les plus grands services à la construction immobilière en France, car elle facilitera beaucoup la tâche des entreprises, comme celle de leurs clients. C'est une indispensable mise en ordre; c'est une mesure fondamentale d'organisation dans l'ensemble des industries du bâtiment.

L'accueil qui nous est fait, lorsqu'il nous est donné de soutenir cette idée, nous encourage à penser qu'il n'est besoin de nulle contrainte pour la faire triompher. Le protocole qui vient d'être signé par M. le Ministre de la Reconstruction est le premier pas dans cette voie où notre Fondation désire s'engager.

\* \*

Reprenant, dans les conditions que nous venons d'indiquer, ces tâches techniques générales, qu'il hérite du Service qui l'a précédé, le Centre Scientifique et Technique trouve un premier programme d'action dans la poursuite de l'œuvre commencée.

Mais il n'est pas question de la continuer, quelque estime que l'on ait pour ce qui a été accompli, sans de considérables modifications, qu'imposent l'expérience et aussi la plus exacte connaissance des possibilités économiques de notre pays.

Le R. E. E. F., que nous appellerons dorénavant *Documentation technique sur la construction immobilière*, devra d'abord notablement évoluer. Il doit se compléter — cela est bien évident —, s'enrichir, et certainement, sur maints sujets, s'amender ou s'assouplir, pour tenir compte des obligations pratiques que nous rencontrons dans les problèmes actuels de la construction. Il doit aussi devenir un instru-

ment plus commode. Tel qu'il est, il constitue un recueil unique de documents de toutes natures. Nous avons le sentiment qu'il nous sera rapidement possible de l'améliorer encore, en poursuivant, de façon active, grâce aux moyens supplémentaires que nous réunissons, l'immense travail qui a déjà été élaboré. Il nous faudra, pour atteindre complètement le résultat que nous nous proposons, compter sur l'audience et sur l'intérêt des architectes et des entrepreneurs; nous essaierons de les associer plus étroitement à ces travaux de rédaction, en faisant participer, plus encore que par le passé, leurs représentants à nos commissions, en demandant leurs avis par de brèves enquêtes, en accueillant et même en provoquant leurs critiques et leurs observations. Les utilisateurs de nos documents doivent nous faire connaître leurs libres opinions, qui nous préciseront leurs besoins exacts. C'est à cette condition que nous parviendrons à leur être aussi totalement utiles que nous le désirons.

Nous ne changerons pas profondément la procédure des agréments techniques, dont l'application s'est déjà traduite — nous venons de le rappeler — par un volume important d'études analytiques sur les procédés et les matériaux nouveaux dont l'instruction fut demandée au Ministère de la Reconstruction. Nous comptons seulement l'accélérer progressivement, en développant nos possibilités d'examen. Mais nous pensons aussi qu'à côté de cette procédure, qui nous permet de garder le contact avec l'évolution technique de la construction, et qui apporte en même temps d'indispensables garanties aux maîtres d'œuvre, une tâche plus positive et plus active doit être entreprise. Il ne s'agit pas seulement de soumettre à un contrôle, que nous croyons du reste efficace, et d'amender à cette occasion les techniques non traditionnelles qui nous sont soumises; il faut aussi que nous arrivions, en tirant profit de ces examens, à faire apparaître, dans les secteurs où les initiatives spontanées ne se manifestent pas, les procédés, les matériaux, les outillages, qui manquent à notre industrie. Nous rejoignons là le programme des recherches auquel s'attache la Fondation.

Nous développerons également de façon méthodique les réglementations spéciales, que nécessite de plus en plus l'utilisation de certains modes particuliers de construction. Nous présentons dans cette première publication certains cahiers des charges relatifs aux conditions techniques que doivent remplir divers types de planchers, certaines catégories d'agglomérés, les tuiles en ciment. Bien d'autres cahiers des charges analogues sont en préparation, que nous communiquerons bientôt aux techniciens.

Voilà donc, tel que le trace le protocole qu'a signé avec la Fondation le Ministère de la Recons-

truction, un premier programme de travail, qui, pour être en apparence précis et limité, n'en a pas moins à nos yeux la plus grande portée pratique. Ajoutons qu'il n'intéresse pas seulement la reconstruction : nous croyons qu'il a la même utilité pour tous les grands maîtres d'œuvre, qui ont un incontestable avantage, pour leurs programmes immobiliers, à se reporter aux mêmes documents de base, acceptés par l'ensemble de la profession.

Mais le protocole indique d'autres attributions du Centre, ou, si l'on préfère, d'autres missions.

Il lui confie, d'une manière générale, un rôle de conseiller technique.

C'est, en particulier, dans la préparation des chantiers expérimentaux qu'est demandé l'avis de la Fondation. Il est en effet indispensable qu'à l'écart des préoccupations immédiates qu'ont tous les services d'exécution, un organisme technique indépendant puisse élaborer un plan rationnel des réalisations d'essai, qu'il puisse étudier chacune d'elles préalablement, qu'il en suive les travaux et qu'il porte un jugement objectif sur les résultats obtenus. On peut en même temps espérer que le Centre Scientifique et Technique pourra élargir au delà du domaine du Ministère de la Reconstruction ce programme de constructions expérimentales, par des accords amiables dont la possibilité nous apparaît. Ainsi seraient évités d'inutiles et coûteuses répétitions, des efforts discordants, des recherches sans objet; ainsi serait établi le plan national de chantiers d'essai auquel nous pensons depuis longtemps.

Bien entendu, ce n'est pas uniquement dans cette direction que s'exercera l'activité de conseiller technique qu'entreprend la Fondation. Il est dans les intentions du Ministère de la Reconstruction de la consulter aussi sur les programmes importants de construction, qui imposent des études délicates, trop souvent négligées dans le passé. La Fondation a déjà commencé à tenir ce rôle, dans certains cas particuliers qui lui ont été soumis par la Direction des Travaux du Ministère. Il peut être question, soit d'études d'ensemble, soit d'études concernant certaines parties des constructions. Pour citer un exemple, il nous est demandé d'apporter à l'Architecte en Chef une collaboration technique dans la réalisation des planchers et des terrasses qui seront exécutés à Marseille, dans la zone de reconstruction du Vieux-Port (200 000 m<sup>2</sup> de planchers).

Nous pourrions rendre des services analogues auprès d'autres maîtres d'œuvre, comme les groupements de sinistrés (dont certains nous ont dès maintenant consultés), les Offices et les Sociétés d'H. B. M., les Sociétés Nationalisées, etc...

C'est dans sa situation privilégiée, créée par les conditions mêmes de sa fondation, c'est dans son

caractère d'organe de collaboration entre les grands maîtres d'œuvre et les représentants professionnels, que le Centre compte trouver l'autorité suffisante pour remplir efficacement sa mission de conseiller.

Nous croyons que cette mission s'élargira, à la mesure progressive de nos possibilités. De cette action, qui ne repose sur aucune contrainte, qui ne fait appel qu'à la persuasion, devra peu à peu se dégager une véritable politique technique de la construction immobilière, qui ne doit pas plus être absente d'un régime libéral que d'un régime dirigiste.

\* \*

C'est spécialement en matières de recherches que le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment reçoit de ses statuts des devoirs particuliers.

Il a la charge, dit l'article 2 de ce texte :

— D'établir un programme national d'études et de recherches relatives au bâtiment et d'en faciliter l'exécution dans l'intérêt de la nation;

— De coordonner et de développer l'activité des organismes et des laboratoires existants, et même de créer les organismes nouveaux qui apparaîtraient nécessaires en matière de recherches, d'études,...

Nous avons déjà dit que les programmes d'études et de recherches devaient être approuvés par le Conseil d'Administration et faire l'objet d'un avis du Comité National du Bâtiment.

Il ne peut être question d'imposer aux organismes qui existent déjà, qui accomplissent des travaux utiles et unanimement appréciés, des buts de recherches qui n'auraient point leur adhésion.

Nous avons du reste insisté, dès le début de cet exposé, sur l'autonomie de ces établissements, que nous désirons entièrement respecter, autant que l'indépendance et la liberté des chercheurs.

Nous pensons toutefois qu'il est conforme à l'intérêt général de proposer au sein des commissions consultatives qui fonctionnent auprès du Centre certains thèmes de recherches, choisis pour leur caractère concret et utilitaire, de façon à concentrer les ressources trop mesurées, sur des objectifs bien déterminés. Pour sa part, le Centre consacra ses propres crédits aux recherches (qu'il contrôlera directement) portant sur les sujets ainsi délimités. Il priera les organismes, qui auront eux-mêmes participé aux travaux des commissions, de tenir compte également dans leurs programmes des recommandations qu'il sera ainsi amené à formuler.

Nous nous efforcerons donc de faire converger les études et les recherches sur des buts communs, fixés d'après leur importance pratique.

Nous éviterons de disperser les efforts, en voulant entreprendre dans toutes les directions, où sur-

gissent pour les chercheurs des motifs d'intérêt, des investigations multiples, que nous n'aurions pas la possibilité de soutenir utilement.

Nous avons dès maintenant préparé un premier plan de recherches, qui sera approfondi et discuté, mais qui fait déjà l'objet de travaux préliminaires.

Pour donner une idée de ce que nous tentons, nous citerons, simplement à titre d'exemple, quelques objets d'études que nous avons engagées ou que nous engageons en ce moment :

En matière de sols et de fondations spéciales, nous nous proposons de rechercher des modes de prospection plus expéditive et plus économique, en comparant les méthodes de sondage habituelles avec la méthode électrique, en réalisant d'autre part un appareil de pénétration à grande profondeur, du même type que celui qui est utilisé par l'Institut de Géophysique de Gand. Nous examinerons par ailleurs les conditions d'exécution des pieux moulés dans le sol, afin d'éviter les accidents auxquels donne trop souvent lieu cette technique; nous nous efforcerons de mettre au point les procédés de mesure des périodes propres de vibration longitudinale et transversale pour déceler les cassures ou les étranglements de pieux.

En ce qui concerne le gros œuvre, nous développerons nos recherches en plusieurs directions.

Nous comptons demander aux laboratoires de poursuivre leurs travaux sur le béton, mais en les orientant vers les problèmes pratiques que pose le moulage d'éléments avec des tolérances données qui présentent une importance toujours croissante dans les techniques actuelles.

Nous étudierons plus attentivement que cela n'a été fait jusqu'à maintenant en France les nouveaux procédés de mise en œuvre du béton, qui commencent à faire leur apparition : aspiration de l'eau non combinable (*vacuum concrete*), béton avec incorporation systématique d'air occlus.

La question des liaisons, des fixations et des assemblages entre éléments de béton, sera aussi méthodiquement abordée.

Nous prendrons également, de façon plus systématique que par le passé, l'examen des bétons légers ou spéciaux : bétons cellulaires, bétons de ponce ou de pouzzolane, béton caverneux, pour tenter d'analyser leurs propriétés physiques et mécaniques, de déterminer leur dispersion, et de définir les conditions de leur constance et de leur homogénéité.

Ce ne sont point les seules études qui nous attacheront dans ce domaine si vaste et si complexe du béton et du béton armé. Citons presque au hasard celles qui concerneront : la corrosion des aciers à béton armé, la perméabilité des bétons, etc... sans

oublier la tenue et la fissuration des enduits au ciment.

Les autres matériaux et les autres procédés de gros-œuvre ne seront pas négligés, qu'il s'agisse de pierre ou de métal, mais je n'ai l'intention ici, je le répète, que d'indiquer quelques thèses, pour montrer dans quel esprit nous désirons mener nos recherches.

On s'expliquera que nous insistions quelque peu sur les problèmes que pose l'utilisation du béton sous toutes ses formes, à cause des tendances générales de la construction notamment de la préfabrication, qui en France comme dans la plupart des pays d'Europe, fait très largement appel aux techniques d'emploi de ce matériau, mais dans des conditions devenues souvent discutables.

C'est à cause du même souci de répondre à des exigences actuelles que nous donnerons une place toute particulière aux études sur les matériaux et les systèmes de couverture. Nous nous intéresserons à tout ce qui touche l'exécution des terrasses avec ou sans étanchéité, persuadés qu'une part importante des immeubles à reconstruire sera couverte de cette façon, pour des raisons d'économie générale. Tous les autres matériaux de couverture, traditionnels et nouveaux, seront l'objet de recherches et d'essais dont l'importance nous apparaît, la pénurie en matériaux de couverture étant une des plus graves dont souffre notre pays. Nous voudrions, dans toute la mesure de nos moyens aider à la solution de ce grand problème.

Dans le secteur, non moins intéressant pour les techniciens, de la finition intérieure des immeubles, des questions nombreuses se posent. Elles sont en général très mal résolues. Qu'il me suffise d'en citer quelques-unes : cloisons à enduits finis, évitant l'emploi du plâtre sur le chantier, plaques de plafond préfabriquées, revêtements de plancher destinés à parer à la pénurie des bois de parquet, revêtements muraux et enduits spéciaux pouvant se substituer aux revêtements céramiques rares et coûteux... Il s'agit là de problèmes d'utilisation de matériaux de surface, que nous étudierons avec la collaboration de fabricants et d'entrepreneurs autant qu'avec celle des laboratoires.

La recherche d'équipements économiques, ensembles-cuisines, ensembles-sanitaires, etc... sera également engagée, en accord avec les constructeurs, en liaison avec les utilisateurs.

Mais c'est en matière de chauffage que nous voulons faire un effort tout particulier.

Le chauffage, on l'a compris maintenant, ne s'étudie pas indépendamment des caractéristiques thermiques de la construction.

C'est pourquoi, avec le conseil des éminentes personnalités qui nous apportent leur concours, nous poursuivrons nos campagnes d'essai sur les besoins en calories des maisons de divers types, campagnes dont les premiers résultats, en cours de publication, sont extrêmement importants. Nous continuerons nos recherches en laboratoire sur les essais thermiques de matériaux. Nous en entreprendrons sur l'influence de l'humidité des matériaux en œuvre. Nous pousserons, par diverses méthodes, l'étude des régimes variables. Et nous ferons sa part, qui est grande, au rôle que joue dans le bilan thermique la puissance reçue, par rayonnement, du soleil et du ciel.

La nécessité de réaliser à la fois des économies de combustible et des économies de premier établissement nous conduit par ailleurs à rechercher des formules simples de chauffage pour les logements modestes, qui doivent constituer l'élément prédominant dans les grands programmes de construction immobilière. Nous pensons que le chauffage à air chaud est une des solutions les plus rationnelles. La mise au point de blocs-chauffage, par amélioration des types existants, sera au premier plan de nos préoccupations.

Nous ne limiterons pas nos activités à cette question, désirant aborder d'autres problèmes, tels que les essais de réception des installations, la régulation et le comptage, que nous comptons traiter sur des réalisations témoins.

Parallèlement, sont ouverts des travaux sur les conduits de fumée et de ventilation, sous le contrôle d'une commission présidée par M. le Professeur RIBAUD, Membre de l'Institut. Outre la mise au point d'une nouvelle réglementation, nous nous proposons d'expérimenter les matériaux nouveaux, auxquels il semble que l'on doive faire appel pour parer à la pénurie de boisseaux en céramique. On connaît la difficulté des questions qui concernent la construction des conduits de fumée et l'embarras où se trouvent nombre d'entrepreneurs et d'architectes pour les résoudre. Nous espérons leur apporter une réponse, au moins partielle et provisoire, dans un très bref délai.

En traçant les lignes de notre action immédiate dans ce vaste champ des recherches thermiques, de manière bien insuffisante, car je n'ai eu que l'ambition de noter — chemin faisant — quelques points qui attirent spécialement notre attention, j'ai en même temps abordé, en ce tableau rapide et incomplet que j'esquisse devant vous, le domaine immense et mal délimité des études fonctionnelles, pour employer un terme commode qui n'est qu'à demi-satisfaisant, ou si l'on préfère, des études relatives à l'habitabilité, ou d'une manière plus générale,

concernant les conditions d'occupation des locaux.

Si l'on doit considérer que le chauffage, le conditionnement, la ventilation, comptent au premier rang de ces études fonctionnelles, elles ne sont évidemment pas les seules.

Nous effectuerons des travaux sur l'éclairage naturel et artificiel, sur les standards d'éclairage à préconiser, sur les effets de l'éclairage fluorescent, sur l'action biologique de certains ultra-violets.

Nous accordons aussi toute sa place, qui est grande, au problème de l'isolation acoustique. Dans l'immeuble collectif, ce problème, presque toujours négligé, présente une réelle gravité. Et il est essentiel pour nous, qui examinons et acceptons des systèmes de construction nouveaux, que nos connaissances progressent dans ce secteur trop délaissé par les techniciens du bâtiment.

En terminant ce large tour d'horizon, je ne voudrais pas oublier d'autres recherches, dont certaines sont entreprises déjà, comme celles qu'accomplit l'Institut d'Études et de Recherches du Centre-Ouest, pour lequel nous finançons l'édification d'une nouvelle soufflerie, où pourront être expérimentés dans des conditions valables les effets des agents atmosphériques, vent et pluie, sur les constructions.

Mais je dois me borner et m'arrêter là dans cette énumération. Elle est forcément longue, car le programme est large, même lorsqu'on a décidé de concentrer tous les efforts sur quelques sujets importants qui jalonnent le champ immense des recherches.

\* \*

Tous ces travaux seront accomplis tant par nos propres moyens que par ceux des laboratoires qui travaillent pour nous.

Nous nous proposons de les répartir au mieux des capacités et des spécialisations des laboratoires français, de façon à réaliser peu à peu ce réseau national des recherches, qui permettra d'orienter vers la construction immobilière l'activité de beaucoup d'hommes de science et de techniciens.

Nous désirons aussi créer, comme le prévoient nos statuts, les nouveaux centres expérimentaux qui manquent à nos techniciens. Mais il s'agit là de projets qui exigeront des investissements importants et qui devront être mûrement élaborés.

Signalons cependant que nous avons pris une première décision : celle de fonder un Centre Expérimental sur le Terrain.

Cette station de recherches n'aura point le même objet que la Cité de Noisy, où sont édifiés des pro-

totypes. Elle sera l'intermédiaire entre le laboratoire et le chantier. Nous pourrions y expérimenter le montage des parties de construction, y faire les essais pratiques qui ne peuvent être exécutés en laboratoire, procéder à des mesures de temps élémentaires, mettre au point de nouveaux matériels de chantier.

Cette expérimentation sera accomplie dans des conditions scientifiques. Elle sera effectuée, comme tous nos autres travaux, sous le contrôle d'une analyse statistique précise, dont trop souvent les chercheurs français ont ignoré la puissance et l'efficacité.

Le Centre Expérimental sur le Terrain sera placé dans la région Parisienne, ou en son voisinage. Il occupera environ trois hectares.

Nous croyons qu'il est indispensable de disposer d'un tel établissement pour promouvoir le développement de techniques nouvelles. C'est le complément obligatoire d'un programme pratique de recherches.

Nous pouvons assurer qu'il sera bientôt une réalité.

\* \*

Nous avons naturellement décidé de publier tous les résultats des études que nous effectuons, que ces résultats s'expriment sous forme de codification, de règlement, de recommandations, d'éléments documentaires, qu'ils prennent l'aspect d'exposés complets, de mises au point ou de contributions partielles et provisoires à l'examen de telle ou telle question.

Nous savons bien que tout ce qui n'est pas imprimé et largement diffusé est pratiquement perdu.

Nous vaincrons la répugnance de beaucoup d'hommes de science ou de techniciens à présenter au public avant de longues maturations les études qu'ils accomplissent, nous rappelant la belle phrase de Lavoisier, si souvent citée : « Il faut avoir le courage de dire des choses imparfaites, de renoncer au mérite d'avoir fait tout ce qu'on pouvait faire, d'avoir dit tout ce qu'on pouvait dire, afin de sacrifier son amour-propre au désir d'être utile, et d'améliorer la marche du progrès. »

Nous créons pour exprimer l'activité du Centre et la mettre au service de la collectivité un nouvel organe : *les Cahiers du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment*. Notre premier numéro paraîtra en juillet. Il sera volumineux et éclectique. Il contiendra le compte rendu de travaux faits par le Centre ou le Service Technique qui l'a précédé, ainsi que par les techniciens qui nous apportent dans nos recherches, en gardant leur indépendance, le concours précieux de leur expérience et de leur talent.

C'est pour nous un très grand effort que d'avoir dans les circonstances actuelles mis sur pied, dans un délai très bref, une publication de cette importance.

Elle s'adresse à tous les publics techniques, architectes, ingénieurs, hommes de science, aussi bien qu'aux organismes qui sont attachés au développement de la construction en France. Nous n'en avons point fait une revue comme les autres, et nous ne voulons point créer une concurrence à nos confrères plus anciens dans la presse technique, qui sont depuis longtemps connus dans tous les milieux du bâtiment.

Nos Cahiers doivent avant tout constituer un instrument de travail, en apportant une documentation récente et contrôlée sur l'évolution de nos connaissances, dans le domaine de la construction.

Nous osons espérer que la publication de ces textes rencontrera votre audience. Il nous faut votre appui, votre attention, vos critiques mêmes, pour que notre œuvre soit vivante et utile.

Elle ne vient du reste pas faire double emploi avec celle que nous publions déjà, par livraisons successives, et dont je vous ai parlé brièvement il y a quelques instants : le R. E. É. F., qui rassemble de façon méthodique tous les documents de codification technique du bâtiment. Nous comptons aussi, à côté de nos Cahiers, ouvrir des collections spécialisées où seront traitées sous forme de monographies, beaucoup de questions d'actualité. Nous organiserons en même temps à la fin de cette année certains cycles de conférences, qui compléteront notre plan de diffusion et de propagande technique.

\* \*

Je n'aurais pas complété comme il convient ce tableau général, très sommairement esquissé, de l'action générale que développe notre Centre, si je n'indiquais point l'importance que nous attachons aux collaborations scientifiques et techniques de caractère international, où s'engage de plus en plus notre pays, et auxquelles nous comptons participer dans la plus large mesure.

Nous avons d'abord formé, avec nos collègues de Grande-Bretagne, un projet de coopération approfondie dont nous attendons beaucoup, car pour la première fois dans le domaine du bâtiment il n'est plus simplement question d'échanges de documentation, de relations courtoises et de visites organisées, mais bien de recherches accomplies en commun, en profitant des ressources que des deux côtés de la mer possèdent nos deux nations.

Qu'il me soit permis d'emprunter à mon éminent ami M. R. FITZMAURICE, Deputy Chief Scientific Adviser au Ministère des Travaux de Londres,

avec qui j'ai jeté les bases de cette collaboration, une longue citation, découpée dans un article remarquable qu'il vient de m'adresser pour le premier exemplaire de nos Cahiers.

« Les problèmes auxquels doivent faire face les industries du bâtiment en France et en Grande-Bretagne présentent de nombreux points communs. Dans les deux pays, d'énormes déficits en matériaux sont la conséquence des ravages de la guerre et des perturbations qu'elle a provoquées dans la production. Les industries intéressées, toutes deux routinières, utilisent surtout des méthodes artisanales de travail. Enfin le coût de la construction a augmenté, ce qui aggrave encore la part de l'effort national absorbée par le bâtiment. Ici et-là en définitive, on ressent le besoin impérieux de faire suivre au bâtiment la tendance générale de l'industrie moderne et de le faire bénéficier des dernières réalisations de la technique.

« Les deux pays n'avancent que lentement dans la voie de l'application de la science à l'industrie du bâtiment. Les chercheurs sont rares et les dépenses considérables. Il devient ainsi nécessaire d'envisager sérieusement la possibilité de hâter le progrès scientifique en partageant l'effort entre deux ou plusieurs pays qui se heurtent aux mêmes problèmes.

« De simples échanges de documentation ou de correspondance, des visites rapides ne suffisent pas.

« Le mode de collaboration capable de se traduire par des résultats concrets et substantiels implique un échange systématique de données quantitatives bien précisées, recueillies dans des conditions d'expérimentation rigoureusement contrôlées, telles que les résultats obtenus dans un pays soient directement comparables à ceux qui sont obtenus dans les autres.

« Tout homme de science qui a essayé de se faire une idée des réalisations obtenues dans son domaine particulier dans d'autres pays, pourra témoigner des déboires et des déceptions que l'on éprouve en raison de l'impossibilité de comparer directement, en l'absence de normes internationales reconnues, le travail accompli dans différents pays. Les essais et les expériences peuvent être basés sur les mêmes principes mais les procédés diffèrent en général par des détails suffisants pour empêcher toute comparaison directe. Si l'on pouvait éliminer cette difficulté, la masse du « matériel » scientifique utilisable dans les divers domaines pourrait s'accroître rapidement.

« La situation est aujourd'hui bien plus propice qu'avant-guerre à une collaboration du type que

nous venons de préconiser. On a mis au point des méthodes très efficaces de contrôle statistique des expériences et d'analyse des résultats. Il est devenu possible d'organiser à l'avance les expériences de façon à obtenir des données comparables. On peut soumettre d'autre part ces données, ou résultats d'expériences et d'essais, à des méthodes perfectionnées d'analyse statistique permettant de distinguer les variations imputables aux techniques expérimentales de celles qui sont dues aux conditions de lieu, de personnes ou de maison.

« Ces raisons incitent à penser qu'une collaboration entre la France et la Grande-Bretagne dans ce domaine particulier de l'activité scientifique est souhaitable et possible. Nous aurons à examiner les moyens de la mettre en pratique. Mais la première condition du succès est maintenant réalisée : il existe dans chacun des deux pays, un organisme national chargé de coordonner les progrès du bâtiment, sur les plans scientifique et technique. La création du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, dont les dirigeants sont acquis à cette idée, offre un instrument idéal de coopération du côté français. Du côté britannique, le Ministry of Works « conseillé » par le Council for Research and Development, qui s'efforce de mettre toutes les formes de l'activité scientifique du bâtiment en accord avec les conditions actuelles de l'industrie en général, constitue un excellent moyen pour centraliser les « informations » de toutes natures en vue de leur échange international. »

Depuis la rédaction de ce texte par M. FITZMAURICE, notre Centre a préparé le projet précis de coopération que nous avons esquissé, et je crois pouvoir dire aujourd'hui qu'il deviendra prochainement une réalité. Il porte sur des points concrets, de caractère scientifique, mais de grande importance pratique, et j'espère pouvoir dans quelque temps l'exposer au public français.

Cette collaboration avec l'Angleterre n'est nullement exclusive de celle que nous pouvons nouer avec d'autres pays. Nous envisageons, M. FITZMAURICE et moi-même, de l'étendre progressivement à d'autres nations, en tenant compte de leurs possibilités techniques et en procédant par voie graduelle et mesurée de façon à ne pas compromettre par un trop rapide développement l'efficacité de ce que nous voulons créer.

Précisons bien que ces formules d'union scientifique respecteront la structure et l'autorité des grandes organisations internationales.

Nous comptons du reste participer activement, si le Gouvernement veut bien continuer à nous le demander, au Comité de l'Habitat de la Commission Économique Européenne, Comité dont j'ai le grand

honneur de présider la Section Technique. Nous nous proposons aussi de rester en liaison, pour toutes ces activités internationales, avec l'U. N. E. S. C. O. avec l'I. S. O., avec la F. I. D., par l'intermédiaire s'il convient des organismes français compétents.

Ainsi pourra se bâtir par un travail patient, dans l'Europe dévastée, un système efficace de coopération scientifique, pour la rationalisation de la construction immobilière.

\* \* \*

Me voici, Mesdames, Messieurs, presque au terme de mon exposé. Et je sais bien que je n'ai pu vous entretenir que de quelques aspects de ce qu'est notre activité. Sans doute leur évocation même rapide suffit-elle à vous donner une première idée de ce qu'est notre établissement, et ce que ce vous pouvez attendre de lui.

Mais je ne voudrais pas achever cette conférence sans indiquer notre intention d'aborder aussi, avec les moyens qui conviennent, deux problèmes essentiels que je m'excuse de présenter aussi sommairement, mais qui en raison de leur importance feront plus tard l'objet de communication au public technique. Nos premiers Cahiers contiendront d'ailleurs des études qui leur sont consacrées.

C'est d'abord à la documentation dans le bâtiment que je fais allusion.

Certes, des centres de documentation existent, et il nous faut en particulier noter le mérite et la qualité du travail qu'effectue sur ce sujet l'Institut Technique. Il ne s'agit point dans notre esprit, vous vous en doutez bien, de nous substituer à de tels organismes. Nous voudrions, au contraire, les aider à développer leur action. Mais le besoin d'une coordination générale se fait sentir. Le bâtiment touche, vous ne l'ignorez pas, à beaucoup de techniques, à beaucoup de sciences, et il doit trouver sa documentation dans un grand nombre de centres spécialisés. Cette nécessité est devenue impérieuse, car c'est un des effets les plus manifestes de l'évolution technique actuelle que de faire sortir les anciennes industries de leur cadre traditionnel pour les amener à faire appel à des matériaux ou à des procédés qui sont du domaine d'autres branches industrielles. De plus, les liaisons internationales dont je vous ai parlé exigent que notre pays, comme tous ceux qui veulent effectivement jouer leur rôle normal dans les organisations d'échanges qui se

constituent, puisse disposer d'un centre national de documentation technique qui pourra assumer les tâches de coordination et de synthèse qui s'imposent maintenant. Notre Fondation, conformément à ses statuts, conformément à la convention de base signée par ses fondateurs, se propose de remplir cette mission. Elle aura deux buts principaux, qu'elle n'atteindra que progressivement : établir et faire adopter une doctrine commune et notamment une classification nationale susceptible d'être transposée sur le plan international, créer un fichier central de documentation qui facilite les recherches des techniciens et des hommes de science.

C'est là un travail de fond, que nous désirons entreprendre à la mesure de nos possibilités matérielles, et que nous mènerons avec continuité.

\* \* \*

Je terminerai enfin, et je m'excuse d'avoir retenu aussi longtemps votre attention, en signalant tout l'intérêt que nous attachons aux problèmes d'organisation rationnelle dans le bâtiment.

Il ne peut s'agir là d'études théoriques. C'est sur des cas concrets que nous espérons, grâce à l'adhésion des maîtres de l'œuvre, des architectes, des entrepreneurs, pouvoir faciliter par notre intervention des essais à grande échelle d'organisation de chantiers.

Nous apporterons notre contribution aux efforts que, pour améliorer la productivité, pour abaisser les prix de revient, doit tenter l'ensemble des professions du bâtiment.

Il faut que le gouvernement et les maîtres de l'œuvre s'élevant au-dessus des difficultés particulières, des obstacles administratifs, des traditions paralysantes, comprennent la fondamentale importance de l'œuvre générale d'organisation qui doit être accomplie, et sachent de leur côté la rendre possible et la favoriser.

Nous reviendrons sur de tels sujets, mais il m'a paru logique d'achever mon exposé, qui fut en définitive consacré aux problèmes techniques du bâtiment, par celui qui les enveloppe tous, et qu'on ne peut résoudre que par l'accord total du maître de l'œuvre, de l'architecte, de l'entrepreneur et du travailleur.

Là comme ailleurs, nous poursuivrons notre mission qui est avant tout d'aider et d'unir.

# ANNALES DE L'INSTITUT TECHNIQUE DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS

## TABLE DES MATIÈRES DU PREMIER SEMESTRE 1948

SÉRIE	ANNALES N°	SÉRIE	ANNALES N°
<b>TECHNIQUE GÉNÉRALE DE LA CONSTRUCTION</b>		<b>TRAVAUX PUBLICS</b>	
M. LÉPINGLE, Comment lutter contre la corrosion des matériaux de construction. . . . .	1	CAMBON, Caisson mobile autoflotteur. . . . .	27
C. CAMERMAN, Sur les cas d'altération des pierres de taille par les fumées. . . . .	14	<b>ÉQUIPEMENT TECHNIQUE</b>	
R. LEROUX, Les éléments organisés de construction. . . . .	23	HÉRODY, Bistre, suie, calcin. . . . .	28
<b>THÉORIES ET MÉTHODES DE CALCUL</b>		<b>AMÉNAGEMENTS INTÉRIEURS</b>	
J. DUTHEIL, Exploitation du phénomène d'adaptation dans les ossatures en acier doux. . . . .	2	H. RABATÉ, Les vernis aux résines artificielles et les peintures dérivées dans les travaux du peintre en Bâtiment. . . . .	10
<b>ESSAIS ET MESURES</b>		<b>MATÉRIEL DE CHANTIER</b>	
G. DAWANCE, Contribution à l'étude de l'effet d'entaille. . . . .	3	JOISEL, Concassage et fragmentation des roches. . . . .	26
R. L'HERMITE, Considérations sur la viscosité, la plasticité et le frottement interne. . . . .	8	<b>DOCUMENTATION</b>	
G. DAWANCE, Une nouvelle méthode pour l'étude de la relaxation des fils d'acier. . . . .	9	DOCUMENTATION TECHNIQUE, N° 15. . . . .	6
DE SOUSA COUTINHO, Détermination des contraintes dans le béton par la méthode du tensomètre photoélastique. . . . .	20	DOCUMENTATION TECHNIQUE, N° 16. . . . .	15
<b>LIANTS HYDRAULIQUES</b>		DOCUMENTATION TECHNIQUE, N° 17. . . . .	25
J. BROCARD, Hydratation et hydrolyse des silicates et des aluminates de calcium en fonction de la température. . . . .	12	<b>QUESTIONS GÉNÉRALES</b>	
H. LAFUMA, Le Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie des liants hydrauliques. . . . .	29	L. FLAUS, Quelques conséquences de l'insuffisance du taux de rationalisation de l'industrie de la construction. . . . .	7
<b>SOLS ET FONDATIONS</b>		KÉRISSEL, Point actuel de la reconstruction; ses perspectives d'avenir. . . . .	19
V. ROMANOVSKY, Recherches sur les propriétés physiques des sédiments meubles. . . . .	13	R. L'HERMINIER, Aérodromes à grand trafic. Étude critique du tracé des pistes. . . . .	24
<b>BÉTON. BÉTON ARMÉ</b>		LAURU, Les chantiers en face de la préparation du travail. . . . .	30
R. L'HERMITE et G. TOURNON, La vibration du béton frais. . . . .	11	A. MARINI, Le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment. . . . .	31
M. BUISSON, Détermination expérimentale de la composition du béton. . . . .	21	<b>MANUEL DU BÉTON ARMÉ</b>	
M. VALENTA, Nouvelles recherches sur la gélivité des bétons. Les bétons aérés. . . . .	22	R. CHAMBAUD, Ponts en arcs encastrés. Méthodes d'avant-projets. . . . .	4
<b>BÉTON PRÉCONTRAIT</b>		<b>MANUEL DE LA CHARPENTE EN BOIS</b>	
M. NETTER, La piste en béton précontraint de l'aérodrome d'Orly. . . . .	5	MANUEL FRANÇAIS DE LA CHARPENTE EN BOIS. . . . .	16
		DUHOUX et VALLETTE, Les cintres en bois pour ouvrages d'art. . . . .	17
		DUHOUX et VALLETTE, Les cintres en bois pour ouvrages d'art. Annexes. . . . .	18

**ANNALES DE L'INSTITUT TECHNIQUE DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS**

28, BOULEVARD RASPAIL, PARIS-VII<sup>e</sup>

---

**QUESTIONS GÉNÉRALES**

---

Nouvelle série.

# ANNALES DE L'INSTITUT TECHNIQUE DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS

## TABLE DES MATIÈRES DU PREMIER SEMESTRE 1948

SÉRIE	ANNALES N°	SÉRIE	ANNALES N°
<b>TECHNIQUE GÉNÉRALE DE LA CONSTRUCTION</b>		<b>TRAVAUX PUBLICS</b>	
M. LÉPINGLE, Comment lutter contre la corrosion des matériaux de construction. . . . .	1	CAMBON, Caisson mobile autoflotteur. . . . .	27
C. CAMERMAN, Sur les cas d'altération des pierres de taille par les fumées. . . . .	14	<b>ÉQUIPEMENT TECHNIQUE</b>	
R. LEROUX, Les éléments organisés de construction. . . . .	23	HÉRODY, Bistre, suie, calcin. . . . .	28
<b>THÉORIES ET MÉTHODES DE CALCUL</b>		<b>AMÉNAGEMENTS INTÉRIEURS</b>	
J. DUTHEIL, Exploitation du phénomène d'adaptation dans les ossatures en acier doux. . . . .	2	H. RABATÉ, Les vernis aux résines artificielles et les peintures dérivées dans les travaux du peintre en Bâtiment. . . . .	10
<b>ESSAIS ET MESURES</b>		<b>MATÉRIEL DE CHANTIER</b>	
G. DAWANCE, Contribution à l'étude de l'effet d'entaille. . . . .	3	JOISEL, Concassage et fragmentation des roches. . . . .	26
R. L'HERMITE, Considérations sur la viscosité, la plasticité et le frottement interne. . . . .	8	<b>DOCUMENTATION</b>	
G. DAWANCE, Une nouvelle méthode pour l'étude de la relaxation des fils d'acier. . . . .	9	DOCUMENTATION TECHNIQUE, N° 15. . . . .	6
DE SOUSA COUTINHO, Détermination des contraintes dans le béton par la méthode du tensomètre photoélastique. . . . .	20	DOCUMENTATION TECHNIQUE, N° 16. . . . .	15
<b>LIANTS HYDRAULIQUES</b>		DOCUMENTATION TECHNIQUE, N° 17. . . . .	25
J. BROCARD, Hydratation et hydrolyse des silicates et des aluminates de calcium en fonction de la température. . . . .	12	<b>QUESTIONS GÉNÉRALES</b>	
H. LAFUMA, Le Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie des liants hydrauliques. . . . .	29	L. FLAUS, Quelques conséquences de l'insuffisance du taux de rationalisation de l'industrie de la construction. . . . .	7
<b>SOLS ET FONDATIONS</b>		KÉRISSEL, Point actuel de la reconstruction; ses perspectives d'avenir. . . . .	19
V. ROMANOVSKY, Recherches sur les propriétés physiques des sédiments meubles. . . . .	13	R. L'HERMINIER, Aérodomes à grand trafic. Étude critique du tracé des pistes. . . . .	24
<b>BÉTON. BÉTON ARMÉ</b>		LAURU, Les chantiers en face de la préparation du travail. . . . .	30
R. L'HERMITE et G. TOURNON, La vibration du béton frais. . . . .	11	A. MARINI, Le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment. . . . .	31
M. BUISSON, Détermination expérimentale de la composition du béton. . . . .	21	<b>MANUEL DU BÉTON ARMÉ</b>	
M. VALENTA, Nouvelles recherches sur la gélivité des bétons. Les bétons aérés. . . . .	22	R. CHAMBAUD, Ponts en arcs encastrés. Méth. des d'avant-projets. . . . .	4
<b>BÉTON PRÉCONTRAIN</b>		<b>MANUEL DE LA CHARPENTE EN BOIS</b>	
M. NETTER, La piste en béton précontraint de l'aérodrome d'Orly. . . . .	5	MANUEL FRANÇAIS DE LA CHARPENTE EN BOIS. . . . .	16
		DUHOUX et VALLETTE, Les cintres en bois pour ouvrages d'art. . . . .	17
		DUHOUX et VALLETTE, Les cintres en bois pour ouvrages d'art. Annexes. . . . .	18